

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DE EFICIENCIA DE UNA ACERÍA
EN SESTAO**

TUTORA: María Belén García
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
AUTOR: Javier Pindado Cebrián

ÍNDICE

1.	Introducción del proyecto	8
1.1	Planteamiento del problema	8
1.2	Objetivos y estructura.....	9
1.3	Localización de la instalación de estudio.....	10
1.4	Esquema de la red de aire comprimido de la instalación llevada a estudio	12
2.	Empleo del aire comprimido en las instalaciones industriales	13
2.1	Definición	13
2.2	Historia.....	13
2.3	Principio de funcionamiento de los compresores y su clasificación	13
2.3.1	Compresión.....	13
2.3.2	El compresor y su clasificación	15
2.3.3	Esquema general de una red de aire comprimido	20
2.4	Tratamiento del aire comprimido y sus elementos.....	20
2.4.1	Refrigeración del aire	21
2.4.2	Secado del aire comprimido	22
2.4.3	Filtrado de partículas sólidas y aceites.....	24
2.4.4	Acumulación del aire	25
2.4.5	Empleo del aire comprimido según calidad del mismo.....	27
3.	Descripción de la acería de Sestao	29
3.1	Orígenes de la siderurgia	29
3.2	Introducción a la acería.....	29
3.3	Acería eléctrica.....	30
3.3.1	El horno eléctrico de arco.....	30
3.3.2	Componentes de un horno eléctrico.....	31
3.3.3	Esquema de las partes de un horno eléctrico	32
3.4	El proceso.....	33
3.5	Ventajas y desventajas del uso del horno eléctrico	33
3.6	Metalurgia secundaria	34
3.6.1	HORNO CUCHARA.....	34
3.7	Unidad compacta	36
3.7.1	Trenes de laminación.....	36
3.7.2	Tren de laminación en caliente	37
4.	Análisis de la planta	41

4.1	Esquema general de la red de aire comprimido de la planta	41
4.2	Medidas tomadas	42
4.3	Resultados para la sala 1.....	44
4.3.1	Gráficas elaboradas a partir de los datos recogidos	46
4.3.2	Porcentaje de funcionamiento	49
4.3.3	Gráficas potencia total y caudal	51
4.3.4	Potencia específica	52
4.3.5	Punto de rocío	53
4.3.6	Curva de frecuencia de caudal	54
4.4	Resultados de la sala 2.....	56
4.4.1	Hoja de datos de los compresores	56
4.4.2	Gráfica de caudal	58
4.4.3	Gráficas de potencia	59
4.4.4	Porcentaje de funcionamiento	60
4.4.5	Potencia y caudal total	62
4.4.6	Gráfica de potencia específica.....	63
4.4.7	Curva de frecuencia de caudal sala 2	64
4.5	Resultado de la suma de ambas salas.....	66
4.5.1	Gráficas de la suma de caudal de ambas salas	66
4.5.2	Graficas de la suma de potencia de ambas salas	67
4.5.3	Gráficas potencia específica para la suma de ambas salas	69
4.5.4	Curva de la suma de los caudales de ambas salas	70
4.6	Análisis de los resultados	72
4.6.1	Resultados sala 1	72
4.6.2	Resultados sala 2	73
5.	Propuesta de mejora	75
5.1	Propuestas para la sala 1	75
5.1.1	Funcionamiento actual	75
5.1.2	Consumo anual actual	76
5.1.3	Propuestas	76
5.2	Propuestas sala 2	80
5.2.1	Funcionamiento actual	80
5.2.2	Consumo anual actual	80

5.2.3 Propuestas	81
6. Evaluación (retorno de inversión)	85
6.1 Retorno de inversión de la sala 1	86
6.2 Retorno de inversión de la sala 2	88
7. Presupuesto	90
8. Conclusiones	91
8.1 Conclusiones para la sala 1	91
8.2 Conclusiones para la sala 2	92
8.3 Conclusión global	93
9. Bibliografía	94



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calidad aire según ISO 8573.1	21
Tabla 2. Clasificaciones industriales del aire comprimido según uso	27
Tabla 3. Datos recogidos de la instalación	44
Tabla 4. Hoja de datos de los compresores actuales	44
Tabla 5. Porcentaje en carga, vacío y parado de los compresores de la sala 1	50
Tabla 6. Resumen de los datos de la sala 1	55
Tabla 7. Hoja de datos de los compresores actuales y los propuestos	56
Tabla 8. Porcentaje en carga, vacío y parado de los compresores de la sala 2	61
Tabla 9. Resumen de los datos recogidos en la sala 2	65
Tabla 10. Resumen de los datos recogidos para la suma de ambas salas	68
Tabla 11. Porcentaje de funcionamiento de cada compresor	72
Tabla 12. Porcentaje de funcionamiento de cada compresor	73
Tabla 13. Consumo anual en la sala 1	76
Tabla 14. Datos de fábrica de los compresores propuestos	76
Tabla 15. Datos de fábrica de los compresores propuestos	78
Tabla 16. Datos de fábrica de los compresores propuestos	79
Tabla 17. Consumo anual en la sala 2	80
Tabla 18. Datos de fábrica de los compresores propuestos	81
Tabla 19. Gastos energéticos anuales actuales y derivados de la propuesta 1	83
Tabla 20. Gastos energéticos anuales actuales y derivados de la propuesta 2	84
Tabla 21. Gastos energéticos anuales actuales y derivados de la propuesta 2	85
Tabla 22. Consumo energético anual para la sala 1.	86
Tabla 23. Consumo de potencia y coste de la energía para la sala 2.	88
Tabla 24. Presupuesto para la nueva instalación	90
Tabla 25. ROI sala 1	92
Tabla 26. ROI sala 2	92
Tabla 27. ROI general	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Localización de la instalación del proyecto, Sestao.	10
Ilustración 2. Localización de la acería de Sestao.	11
Ilustración 3. Mapa de la instalación.	12
Ilustración 4. Ciclo de compresión del aire.	14
Ilustración 5. Esquema de la clasificación de un compresor.	15
Ilustración 6. Funcionamiento de un compresor fijo.	17
Ilustración 7. Funcionamiento de un compresor variable.	18
Ilustración 8. Funcionamiento de un compresor centrífugo.	19
Ilustración 9. Funcionamiento de un compresor fijo más un compresor variable.	19
Ilustración 10. Esquema de la instalación de aire comprimido.	20
Ilustración 11. Representación de la refrigeración en el interior de un compresor	22
Ilustración 12. Esquema del circuito frigorífico y circuito por adsorción	24
Ilustración 13. Concentración de partículas a presión atmosférica y a 7 bar (g).	24
Ilustración 14. Esquema de un filtro	25
Ilustración 15. Depósito de almacenamiento	26
Ilustración 16. Acería eléctrica.	30
Ilustración 17. Esquema del horno eléctrico	32
Ilustración 18. Horno cuchara.	35
Ilustración 19. Proceso de moldado y enfriado (slab)	36
Ilustración 20. Tren de laminación	37
Ilustración 21. Zona de bobinadoras	40
Ilustración 22. Esquema de la instalación de aire comprimido	41
Ilustración 23. Disposición de los aparatos de medida	43
Ilustración 24. Modos de funcionamiento de los compresores	45
Ilustración 25. Caudal y presión de la sala 1	46
Ilustración 26. Potencia de los compresores 1, 2, y 3.	47
Ilustración 27. Potencia de los compresores 4, 5 y 6	48
Ilustración 28. Potencia de los compresores de la sala 1	49
Ilustración 29. Potencia total y caudal para la sala 1	51
Ilustración 30. Potencia específica de la sala 1	52
Ilustración 31. Punto de rocío medido en la sala 1	53
Ilustración 32. Frecuencia de caudal de la sala 1	54
Ilustración 33. Compresor GA 75	57
Ilustración 34. Caudal de la sala 2	58
Ilustración 35. Potencia de los compresores de la sala 2	59
Ilustración 36. Potencia de los compresores de la sala 2	60
Ilustración 37. Potencia total y caudal de la sala 2	62
Ilustración 38. Potencia específica de la sala 2	63
Ilustración 39. Curva de frecuencia de caudal para la sala 2	64
Ilustración 40. Caudal total de ambas salas	66
Ilustración 41. Potencia total de ambas salas	67
Ilustración 42. Caudal total de ambas salas. Potencia específica	69
Ilustración 43. Frecuencia del caudal para la sala 2.	70

Ilustración 44. Frecuencia de Caudal y funcionamiento de los compresores de la sala 1	73
Ilustración 45. Frecuencia de caudal y funcionamiento de los compresores de la sala 2	74
Ilustración 46. Funcionamiento actual sala 1. Comparativa.....	75
Ilustración 47. Funcionamiento del compresor centrífugo C1000 y C700	77
Ilustración 48. Frecuencia de Caudal y funcionamiento de los compresores de la sala 1	78
Ilustración 49. Frecuencia de caudal y funcionamiento de los compresores de la sala 1.....	79
Ilustración 50. Funcionamiento actual de sala 2	80
Ilustración 51. Funcionamiento de los compresores variables propuestos	81
Ilustración 52. Funcionamiento de los compresores fijos propuestos.....	82
Ilustración 53. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 1 de la sala 2	83
Ilustración 54. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2	84
Ilustración 55. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2	86
Ilustración 56. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2.....	88
Ilustración 57. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2.....	91
Ilustración 58. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2.....	92

1. INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente proyecto tiene como objetivo el análisis y estudio de una acería con el propósito de detectar las posibles anomalías de cálculo y dimensionamiento de los diferentes sistemas constituyentes de la instalación de aire comprimido, así como la detección de sistemas obsoletos para la propuesta de renovación de los mismos por otros elementos más novedosos con el fin último de mejorar el rendimiento de la instalación.

La planta industrial que se analiza en el proyecto es una acería que combina todas las operaciones necesarias para producir bobinas de acero laminado a partir de chatarra y pre reducidos de hierro. Las distintas instalaciones que componen la planta se encuentran distribuidas en una nave de 520 metros de largo, en cuya cabecera se encuentra la acería eléctrica y a continuación se ubica la unidad compacta compuesta por: colada continua y tren de laminación.

La planta está situada sobre la ría de Bilbao y emplea como principal materia prima la chatarra, que es transportada en su mayoría en barco. La planta cuenta con un muelle para la descarga del material. A continuación la chatarra se clasifica y se lleva al horno eléctrico para su posterior tratado.

Durante el año 2007 la planta produjo 1,5 millones de toneladas de acero en bobinas. Actualmente las empresas están tomando conciencia sobre la eficiencia de sus plantas y sus consumos anuales. Es importante que cada tiempo se hagan revisiones del estado de los compresores y de la red de aire comprimido en general, detectando posibles fugas y falta de eficiencia en alguno de sus componentes. De esta manera se conseguirá disminuir el consumo anual de la planta.

En el presente proyecto se llevará a cabo un estudio de eficiencia energética de una red de aire comprimido de una acería. Para ello antes de abordar este asunto se debe introducir:

- Funcionamiento de una acería en sus dos principales partes: acería eléctrica y unidad compacta.
- Se va a profundizar en el aire comprimido y su correcto uso en una planta industrial, puesto que este es el tema principal del proyecto.
- También se presenta las diferentes tecnologías que se usan en los compresores actuales, sus ventajas y desventajas.
- Finalmente se proponen varias soluciones para el ahorro de energía y su elige la más adecuada. *[Referencia bibliográfica 13,15 y 17]*

1.2 OBJETIVOS Y ESTRUCTURA

El objetivo final del proyecto es la realización de un estudio que permita optimizar la eficiencia de una instalación de aire comprimido, instalada en una planta de producción de acero, reduciendo de este modo, el consumo energético de la misma.

La instalación objeto de estudio cuenta con dos salas independientes que generan el caudal demandado por la instalación. Una de ellas, la que más caudal genera, consta de seis compresores, mientras que la otra está equipada con cuatro máquinas.

El presente estudio consta de dos fases perfectamente diferenciadas:

- En la primera fase, se realizarán una serie de medidas in-situ, que incluye la realización de medidas de potencia, caudal, presión y punto de rocío para cada una de las salas de las que dispone la planta, empleando para ello aparatos de medida como caudalímetros, pinzas amperimétricas y otros sensores.
- En la segunda fase se llevará a cabo el análisis de los datos obtenidos. Se realizará la documentación de todas las mediciones obtenidas en una hoja de tratamiento de datos como Excel y se tratará cada magnitud. Con posterioridad, se grafican e interpretan, para finalmente, establecer el modo de trabajo de cada compresor en particular, obteniendo así una idea del funcionamiento de cada uno de ellos en la red de cada sala.

Se estudiará la tecnología instalada actualmente en la planta, dado que generalmente suele estar obsoleta. Además se prestará especial atención al número de compresores instalados, puesto que en la mayoría de las fábricas estos elementos se suelen encontrar sobredimensionados.

Por último se va a proponer una mejora en la instalación consistente básicamente en el cambio de tecnología y en la mejora de la integración de unos compresores con otros. También se propondrá una sustitución de los compresores de tecnología fija actuales, por una mezcla de tecnología fija – variable.

De todo lo anterior, se deriva un ahorro, tanto económico como energético, debido al mejor funcionamiento de las soluciones propuestas respecto de las instaladas inicialmente, además de porque entran en juego menos compresores. Con esta metodología, lo que se pretende es como se ha comentado con anterioridad un ahorro de energía y de recursos, por lo que como solución a los equipos obsoletos disponibles, se plantea que algunas de las unidades se queden como backup, para solucionar posibles averías de otros compresores instalados.

El proyecto se estructurará atendiendo a cuatro bloques principales:

- En primer lugar se hace una introducción del proyecto, definiendo el tema, alcance, relevancia y objetivos del mismo.
- Seguidamente se explica el funcionamiento del aire comprimido y sus componentes en la industria y de la acería que vamos a estudiar en concreto.
- A continuación se pasa a mostrar y analizar los datos recogidos y el funcionamiento de la planta. Se proponen soluciones más eficientes a las actuales y se comparan los nuevos datos obtenidos con los anteriores.
- Finalmente se da un presupuesto y unas conclusiones de la propuesta que resulte más eficiente para cada sala.

1.3 LOCALIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE ESTUDIO

La finca del objeto de estudio se encuentra en el municipio vizcaíno de Sestao perteneciente a la comarca de Bilbao, situado en la margen izquierda de la ría del Nervión. Las coordenadas donde está ubicada la instalación son: $43^{\circ} 18' 53'' \text{N} / 3^{\circ} 00' 6'' \text{O}$.

La disposición de la instalación a estudio es la mostrada en la **Error! Reference source not found.**

La Ilustración 2 muestra la ubicación exacta de la acería y se observa su proximidad a la ría.



Ilustración 1. Localización de la instalación del proyecto, Sestao.



Ilustración 2. Localización de la acería de Sestao.

1.4 ESQUEMA DE LA RED DE AIRE COMPRIMIDO DE LA INSTALACIÓN LLEVADA A ESTUDIO

En la Ilustración 3 muestra el esquema de la acería a estudio. Las dimensiones de la nave son 500x150 metros y su superficie de 75.000 m². Dispone de dos accesos en fachada este que dan acceso a la fábrica. En el interior existen dos recintos acondicionados para albergar las instalaciones de aire comprimido convenientemente ventilados hacia el exterior de la nave.

El aire comprimido se distribuye a través de tuberías para dar caudal a la totalidad de la planta.

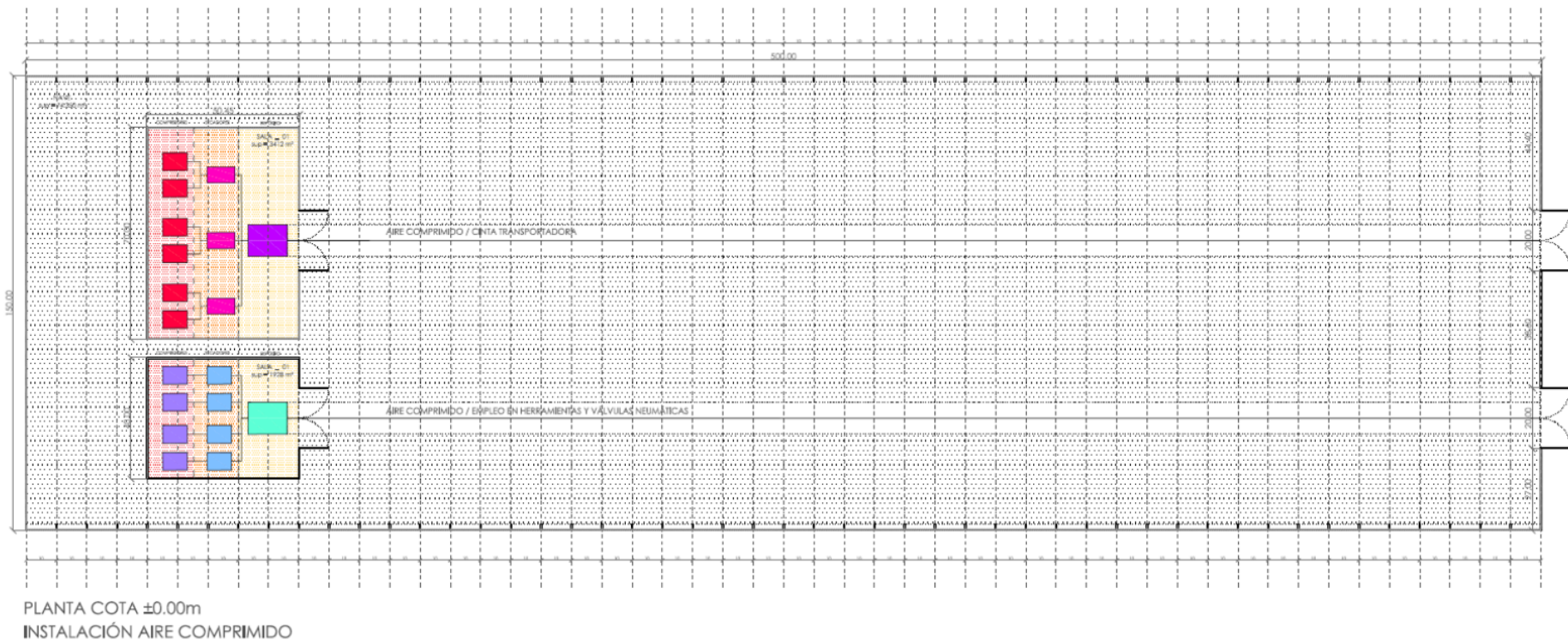


Ilustración 3. Mapa de la instalación.

2. EMPLEO DEL AIRE COMPRIMIDO EN LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES

En este segundo punto se introduce un estudio del aire comprimido en las instalaciones industriales actuales.

2.1 DEFINICIÓN

El aire comprimido es una tecnología muy empleada en la industria moderna, desde pequeños talleres a grandes industrias. Consistente en recoger aire del exterior de la planta, aumentar la presión de éste para después distribuirlo por una red de tubos que recorren la instalación y posteriormente emplearlo en distintas funciones. Lo positivo de este sistema frente a los sistemas hidráulicos es su rapidez y el inconveniente es su menor precisión. Frente a otras tecnologías cabe destacar que es una técnica muy limpia puesto que no genera CO_2 .

2.2 HISTORIA

El compresor más antiguo que se conoce es el propio sistema respiratorio del ser humano que recoge el aire del exterior y después lo expulsa.

Los griegos y romanos empleaban fuelles para la forja del hierro. En el año 1650 el ingeniero físico alemán Otto Von Guericke inventó la bomba de vacío, con la cual investigó con la presión del aire. Gracias a este avance se fijó la base de compresores que vinieron algo después.

El primer compresor fue creado en 1762 se le denominó “cilindro soplador” y podía producir 99,9 kPa.

En 1829 el primer compresor de aire comprimido fue patentado y cuarenta años después, 1872, se mejoró el compresor añadiéndole unos chorros de agua que refrigeraban los cilindros. [Referencia bibliográfica 11 y 16]

2.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS COMPRESORES Y SU CLASIFICACIÓN

A continuación se explica el ciclo por el cual se comprime un gas, la clasificación de los compresores y el esquema principal de una red de aire comprimido.

2.3.1 Compresión

La compresión es el proceso por el cual se eleva la presión de un fluido gaseoso por una disminución de su volumen específico.

El ciclo de compresión se puede ver en la Ilustración 4 y consta de las siguientes fases:

- El primer paso es *aspiración* (4-1) en el cual se recoge el aire del exterior aumentando el volumen interior a presión constante.
- En el segundo se produce una disminución del volumen y por lo tanto un aumento de la presión. Este proceso es denominado *compresión* y se distinguen dos tipos:
- Compresión isoterma (1-2): cuando la compresión se da a una temperatura constante.
- Compresión adiabática (1-5): cuando la compresión ocurre sin intercambio de calor.

En realidad en los compresores no se consigue ninguna de estas dos compresiones, sino que es mezcla de las dos. A esta suma de ambas se llama compresión politrópica.

- El tercer paso es la disminución de volumen a presión constante, también llamado descarga.

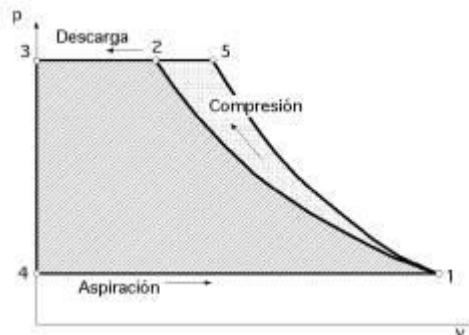


Ilustración 4.Ciclo de compresión del aire.

Si se asume el aire como gas ideal entonces se puede ver su evolución en un proceso de compresión a partir de la siguiente fórmula:

$$P V = n R T$$

Puesto que el volumen ha disminuido, la temperatura del gas se ha incrementado. Esta es la explicación de la elevada temperatura del aire a la salida del compresor.

También se explica la mayor concentración de agua, polvo y otros agentes, puesto que las mismas partículas ahora están en un volumen muy inferior.

2.3.2 El compresor y su clasificación

El compresor es el elemento que va a comprimir el aire en la red de aire comprimido. Se pueden distinguir varios tipos según: el modo de compresión y el funcionamiento del mismo. Su clasificación se muestra en la Ilustración 5 :

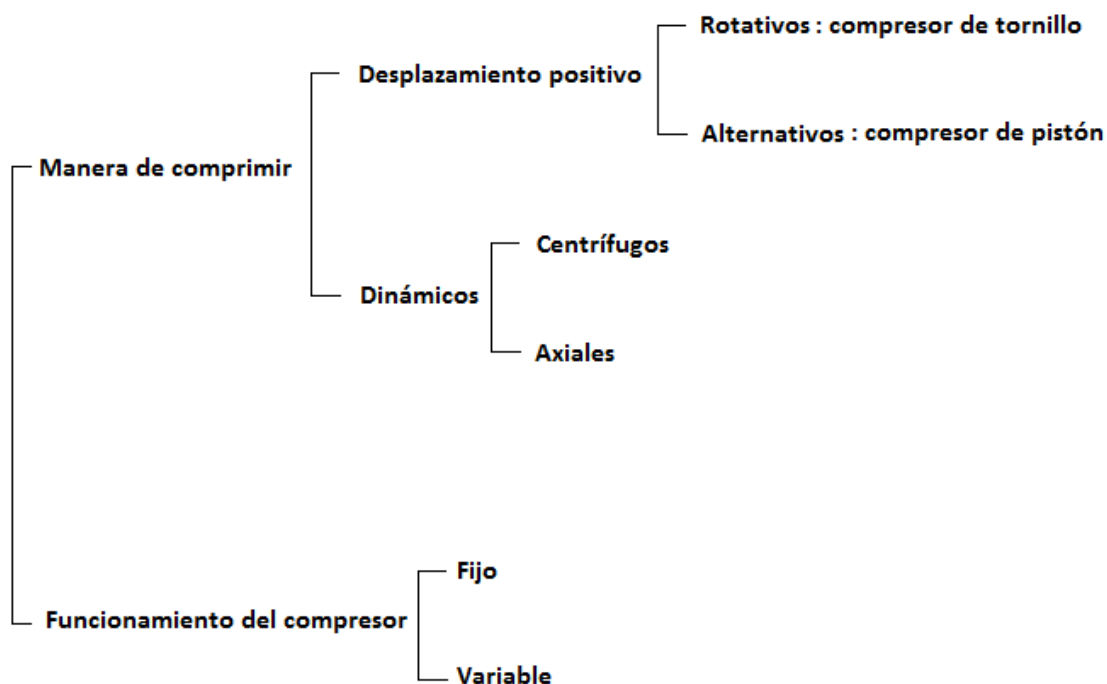


Ilustración 5. Esquema de la clasificación de un compresor.

Si se atiende a la manera de comprimir el aire, se pueden distinguir dos grupos de compresores: **de desplazamiento positivo** y **dinámico**.

Los *compresores de desplazamiento positivo* aumentan la presión por la reducción de un volumen a partir del desplazamiento de un pistón o mediante un elemento rotativo. Distinguiéndose varios tipos:

- Los **compresores rotativos** que producen aire comprimido por un procedimiento rotatorio y continuo, empujan el aire desde la aspiración hasta la descarga. Un ejemplo de compresor rotativo es el compresor de tornillo.
- En **los alternativos** su tecnología es la de un pistón que disminuye el volumen. Un compresor de pistón es el de pistón.

En los *compresores dinámicos* el fluido recibe una aceleración mediante los rotores, imprimiéndole una gran velocidad y convirtiendo esta última en presión. En cuanto a los compresores dinámicos debemos destacar:

- Las **máquinas centrífugas** comprimen el caudal mediante la acción dinámica de las paletas giratorias que forman parte del rodete. La otra parte que integra a este tipo de compresores es la carcasa que primero impulsa el aire hasta el rodete y después lo recibe de este a una presión mayor. Este tipo de compresores se usa cuando en industria que se necesita generar gran cantidad de caudal y de manera constante. Proporciona más volumen que un compresor de desplazamiento positivo del mismo tamaño.
- Los **compresores axiales** están formados por dos discos llamados rotores y estatores recubiertos por una serie de álabes. Entre rotor y rotor se coloca un espaciador que permite introducir en medio un estator. Su funcionamiento consiste en una aceleración del aire a través del rotor para después ser frenado, esta energía cinética se convierte en presión. Este proceso se repite una y otra vez en cada escalón.

Debido a su alto rendimiento y facilidad de acoplamiento este último es el más empleado en aviación. [Referencia bibliográfica 7]

En cuanto al funcionamiento existen compresores de **tecnología fija y variable**. Además se pueden combinar ambos modos de funcionamiento resultando una configuración muy eficiente. El comportamiento de estos compresores y sus posibles configuraciones se explican a continuación:

- Los *compresores fijos* al entrar en funcionamiento dan un caudal máximo, siendo constante en todo momento. Es recomendable su uso cuando el caudal demandado debe ser muy constante. La potencia específica de estas máquinas es mejor que la de los compresores variables.
- Las *máquinas variables* son capaces de regular el caudal generar. A diferencia de los fijos pueden trabajar desde el punto de apagado hasta plena carga pasando por todos los puntos del recorrido. Se aconseja su uso para caudales no muy grandes y variables.

Vista la clasificación de los compresores según la forma de comprimir y su tecnología, a continuación se analizan en detalle los *compresores instalados en la planta* y los que se *proponen* para poder conocer más a fondo su funcionamiento. Los compresores que en capítulos posteriores se verán son:

- El *compresor fijo* es aquel que ateniéndonos al caudal tiene dos maneras de funcionar, sin generar flujo o entregando el máximo posible. Todas las máquinas de las que dispone la planta emplean esta tecnología.

La Ilustración 6 muestra el esquema de funcionamiento de un compresor fijo. Estos compresores tienen tres puntos de funcionamiento: apagado 1, vacío 2 y carga 3. Con el compresor en marcha, podemos encontrar la máquina entregando el 100% del caudal (carga) o el 0% (vacío). En el caso en que la instalación no precise aire, el compresor se mantiene encendido en estado de vacío, consumiendo aproximadamente 30% de la potencia nominal pero sin generar aire comprimido. Este punto es necesario para evitar el continuo encendido/apagado que calienta en exceso los bobinados en el arranque. Después de permanecer en este estado de vacío durante un tiempo predeterminado (entre 10 y 20 minutos), el compresor se para (apagado). Los paros de este tipo de máquinas suelen estar limitados a tres por hora. Al no tener puntos intermedios de generación de caudal, este tipo de compresores se representan con línea discontinua.

Funcionamiento de un compresor fijo

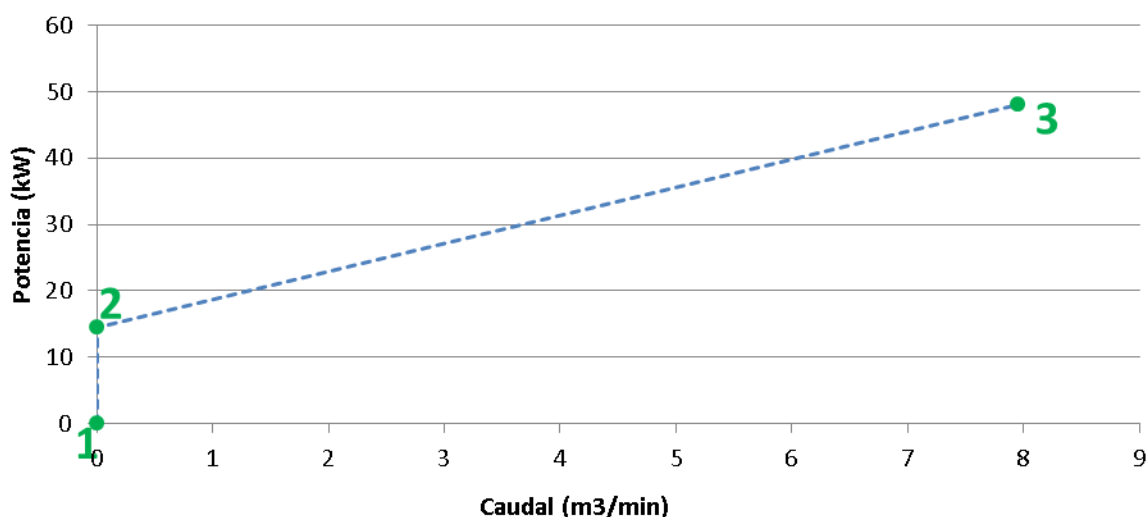


Ilustración 6. Funcionamiento de un compresor fijo.

El esquema de un *compresor variable* se muestra en la Ilustración 7, este tipo de máquinas tiene la capacidad de generar el caudal demandado en cada momento por la planta, es decir, regula entre 0 m3/min y el máximo de caudal que puede entregar el compresor. Como se explicó con anterioridad el compresor fijo sólo pasa por dos puntos de funcionamiento, mientras este tipo de tecnología pasa por todos los puntos posibles de su gráfica característica (punto 1, punto 2 y punto 3). En el esquema se representa con una línea continua, para reflejar su carácter variable.

El punto de “**apagado**” corresponde a un caudal y potencia de valor cero. En contraposición a los compresores de tecnología fija, esta tecnología no necesita un punto de “stand by” o “vacío”, puesto que puede parar y arrancar las veces que sea necesario. Al no permanecer en stand by, conseguimos un ahorro importante puesto que es un punto de gasto de potencia que no genera caudal. Después de correr todo

el gráfico llegamos a un punto de “**máximo caudal**”, en el cual se entrega el mayor caudal posible trabajando el compresor a plena carga.

Compresor variable

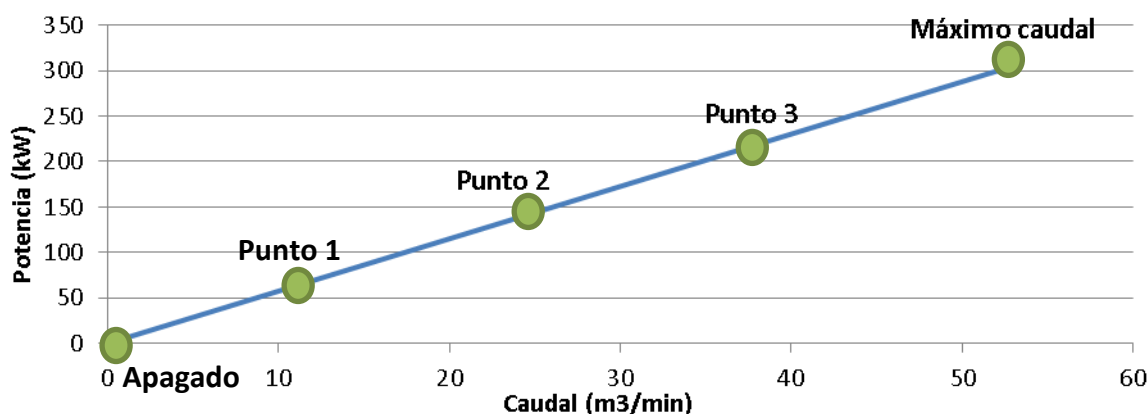


Ilustración 7. Funcionamiento de un compresor variable.

- Los *compresores centrífugos* se caracterizan por generar un gran volumen de aire comprimido. Se instalan en plantas con gran demanda de caudal. Este tipo de compresor se verá más tarde en el apartado de propuestas con el fin de disminuir el consumo de potencia de la planta.

Estas máquinas funcionan según la Ilustración 8 que se muestra a continuación. Tiene un **punto de apagado** o inicio, después pasa al **punto 1** donde consume una potencia mínima (en este caso 756 kW) con la que genera un caudal fijo (126 m3/min). Observamos que con esta potencia es capaz de entregar todo el rango de caudal desde 0 m3/min hasta 126 m3/min, esto es debido a que posee dos válvulas: de admisión y de bypass con las que regula el caudal entregado.

En el **punto 2** consume la misma potencia que en el punto 1, pero debido a que las válvulas están abiertas al máximo, entrega el total del caudal a mínima carga. Después el compresor comienza a regular la potencia y de esta manera entrega el caudal deseado, funciona como un compresor variable.

El **punto de plena carga** es el punto para el cual el compresor funciona a máximo rendimiento entregando el máximo de caudal posible. Para este último punto del ejemplo consume 1117 kW y es capaz de generar 220 m3/min.

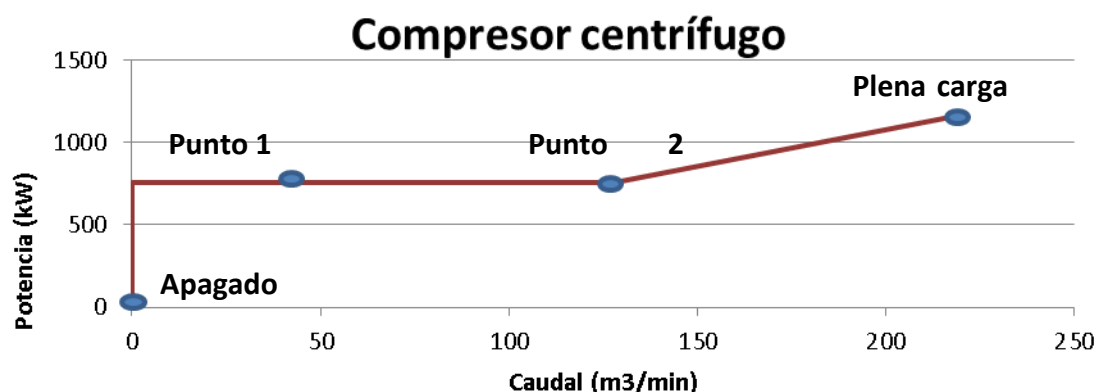


Ilustración 8. Funcionamiento de un compresor centrífugo.

- A continuación se muestra la Ilustración 9 el comportamiento al mezclar ambas tecnologías (*fijo y variable*), siendo un modo de funcionamiento muy eficiente.

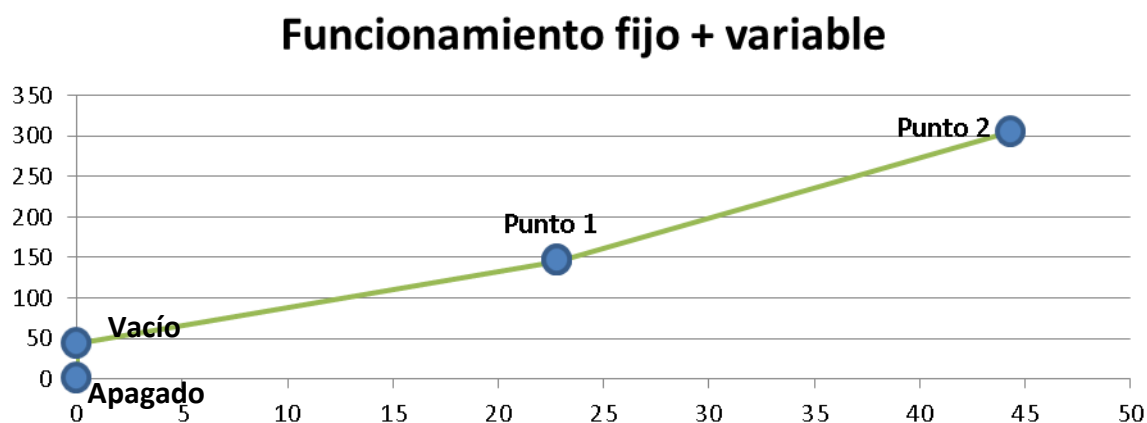


Ilustración 9. Funcionamiento de un compresor fijo más un compresor variable.

El esquema presentado arriba muestra el modo de trabajo al integrar un compresor fijo y un compresor variable. El funcionamiento comienza con un compresor fijo con sus puntos característicos como son: apagado, vacío y el punto de plena carga; una vez entregado el máximo caudal posible, entonces entra a funcionar el segundo compresor (variable) ajustando la demanda necesaria en cada punto. Primero se pone el fijo puesto que funcionando a plena carga, que es como se prevé que va a trabajar observando la curva de frecuencias de caudal, es más eficiente que el compresor variable. Después entra el compresor variable que ajusta perfectamente cada punto demandado de caudal.

2.3.3 Esquema general de una red de aire comprimido

El esquema de una red de aire comprimido debe tener al menos estos componentes: compresor, depósito de aire, secador y filtros.

En la Ilustración 10 muestra un croquis de una red de aire comprimido. Si se observa de derecha a izquierda se tiene el compresor que es el encargado de generar el aire en cuyo interior se disminuye algo la temperatura de salida. Después se aprecia el depósito que se encargará de almacenar y proporcionar una presión constante a la red de aire comprimido. Seguido se colocan los filtros más gruesos para desechar las impurezas del aire. A continuación van los secadores, encargados de secar el aire y así obtener un punto de rocío óptimo que evite la condensación de agua. Y por último se pueden colocar otros filtros que recogen partículas más finas.

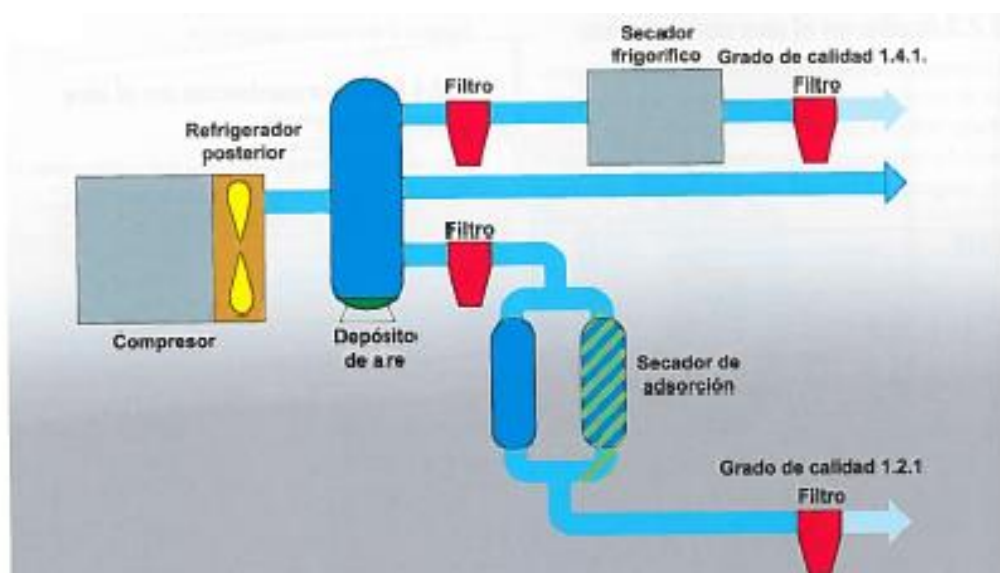


Ilustración 10. Esquema de la instalación de aire comprimido.

El orden de los elementos no debe ser necesariamente el mostrado arriba, en ocasiones se opta por variar el orden por ejemplo de depósito y secadores, poniendo primero los secadores y a continuación el depósito. De esta manera se evita que el depósito recoja agua. La red de aire comprimido instalada en la acería tiene el siguiente orden en sus componentes: compresores-secadores-depósito-filtro.

2.4 TRATAMIENTO DEL AIRE COMPRIMIDO Y SUS ELEMENTOS

El aire empleado en la instalación debe ser lo más puro y exento de humedad. De esta manera aseguramos una mayor vida al conjunto del aire comprimido y el correcto funcionamiento de las herramientas para las cuales va destinado este aire.

Cuando el compresor recoge aire del exterior a través de su válvula de entrada, éste puede contener agentes que debemos eliminar como partículas sólidas (polvo) y agua en

suspensión. Además también se generan partículas durante el recorrido del aire por su instalación, por ejemplo de la corrosión de las tuberías y aceite proveniente de la lubricación del compresor.

Al eliminar estas partículas se consigue que el aire no corroa las tuberías posteriores y de esta manera ahorramos en mantenimiento y en gastos del equipo.

La calidad del aire está tipificada según pureza, dependiendo del uso que queramos dar. Se muestra en la tabla siguiente (Tabla 1. Calidad aire según ISO 8573.1):

Clase	Partículas sólidas: número máximo de partículas por m ³			Agua PR a presión (°C)	Aceite (Incluido vapor) mg/m ³
	0.1-0.5 Micra	0.5-1.0 Micra	0.5-1.0 Micra		
1	100	1	0	-70	0.01
2	1000	100	10	-40	0.1
3	/	1000	500	-20	1
4	/	/	1000	3	5
5	/	/	20000	7	/
6	/	/	/	10	/

Tabla 1. Calidad aire según ISO 8573.1

Para conseguir la calidad deseada emplearemos filtros y sistemas de secado de aire específicos para cada caso.

A continuación se detallan los procesos que debe seguir el aire y los elementos que intervienen, antes de poder emplear este caudal para su uso final. *[Referencia bibliográfica 4 y 9]*

2.4.1 Refrigeración del aire

Una vez recogido el aire del exterior es comprimido por el compresor, este proceso genera un calor excesivo debido a la compresión del gas, como se ha explicado con anterioridad.

El aire debe ser refrigerado hasta una temperatura similar a la cual recogemos este volumen. El propio compresor tiene sistemas de refrigerado que pueden ser:

- Para compresores pequeños: refrigeración circulación forzada o por temperatura ambiente.
- Para compresores de dos etapas: refrigeración por agua, aceite y mezcla de ambas.

En la imagen siguiente (Ilustración 11. Representación de la refrigeración en el interior de un compresor) se observa que el caudal primero pasa por un circuito refrigerador aire-aire con un ventilador que hace reducir la temperatura en una primera fase. Seguidamente pasa a un segundo circuito de refrigeración en el cual hay un líquido refrigerante que con su compresión y descompresión se consigue que enfriar con resultados óptimos el aire que después se empleará.

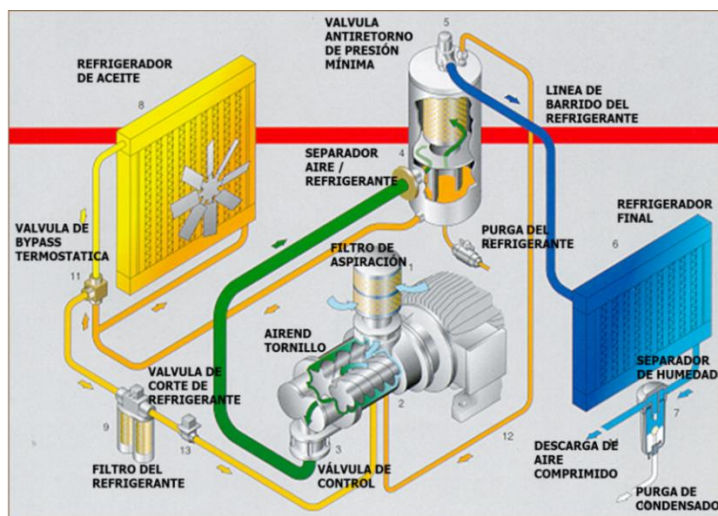


Ilustración 11. Representación de la refrigeración en el interior de un compresor

2.4.2 Secado del aire comprimido

El aire recogido del exterior contiene una cantidad absoluta de humedad. Si ésta supera una temperatura determinada, llamada humedad de saturación, entonces el agua existente en el aire se condensará en forma de gotas de agua que afectan gravemente al funcionamiento de la instalación.

Otra forma de definir el grado de humedad del aire es el punto de rocío (PR), el cual marca la temperatura límite para que el aire condense formando agua líquida.

La solución es mantener la temperatura por encima del PR y de esta manera se consigue que no condense.

Para variar el punto de rocío se retira la cantidad de agua necesaria para alcanzar el valor deseado. Se realiza mediante el proceso de secado en el interior de los secadores.

El secado del aire aumenta la temperatura a la cual condensa las partículas de agua incluidas en el caudal.

También cabe destacar que un PR muy bajo denota aire muy seco, y por el contrario PR elevado significa alta humedad.

Los sistemas de secado son dos:

a) *Secado por adsorción:*

Este tipo de secadores disponen de dos tanques en cuyo interior contienen un adsorbente sólido de naturaleza regenerable llamado alúmina, que sirve para absorber el agua suspendido en el aire.

Este proceso tiene dos ciclos: secado y regeneración.

En el proceso de secado, se retira el agua que contiene el aire suministrado por el compresor. Este agua queda recogido en la alúmina. El proceso de regeneración consiste en el secado de la alúmina para su uso óptimo. Los dos procesos son simultáneos, es decir, mientras se seca el aire en un tanque, en el otro se está regenerando el componente secador.

En la regeneración, retiramos el agua del material adsorbente mediante dos posibles procesos: por aporte de calor y por suministro de aire seco, esto dependerá del tipo de secador elegido:

- Se aporta calor a una de las torres mediante un calentador y un ventilador que inyecta aire recogido del exterior a una elevada temperatura durante varias horas, consiguiendo así secar el material.
- Al inyectar aire seco. Se pasa aire del tanque que está secando, al tanque que está regenerando y se consigue así el secado de la alúmina.

La segunda imagen de la Ilustración 12 muestra los dos compartimentos, uno de regeneración y otro de secado.

b) Secado por refrigeración:

El secado del aire comprimido se lleva a cabo en dos etapas. En el primer tramo el agua entra en un circuito dónde existe un intercambiador de aire, de esta forma retiramos parte del agua mezclado con el aire. Después pasa a la segunda etapa, dónde hay otro circuito con un gas refrigerante térmico en el interior de un radiador que mediante compresión-expansión eleva su temperatura y elimina el resto del agua. Después de recorrer todo el circuito el aire está seco y preparado para ser empleado.

Como se observa en la primera imagen de la Ilustración 12, el sistema de refrigeración consta de dos circuitos distintos, uno de aire y otro de refrigeración.

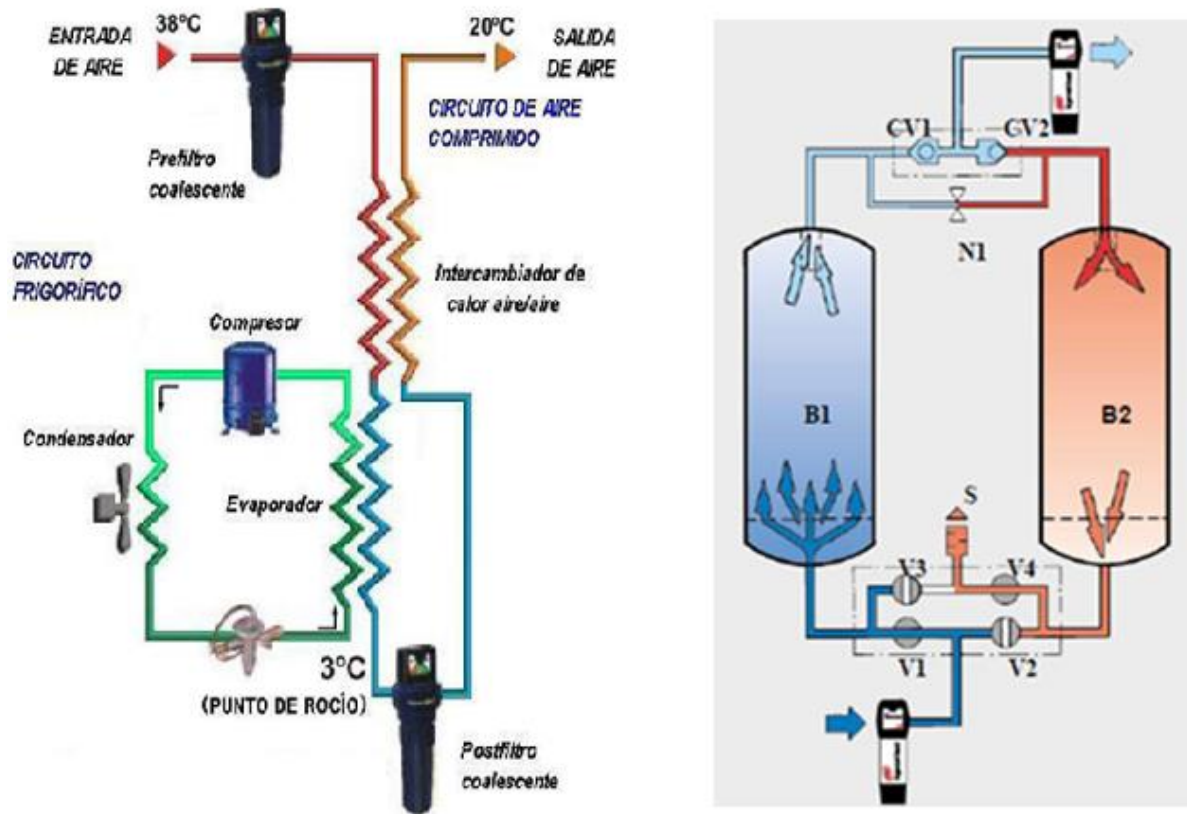


Ilustración 12. Esquema del circuito frigorífico y circuito por adsorción

2.4.3 Filtrado de partículas sólidas y aceites

El aire recogido del exterior contiene una alta contaminación, a esto se le suman partículas que genera el compresor como son aceites y partículas procedentes del desgaste del mismo.

Después de comprimir el aire la concentración de partículas aumenta y es un aire con el que no conviene trabajar. La Ilustración 13 muestra la concentración a presión atmosférica y después esta misma a presión de 7 bar (g).



Concentración atmosférica Concentración comprimida a 7 bar (g)

Ilustración 13. Concentración de partículas a presión atmosférica y a 7 bar (g).

Debemos filtrar el aire recogido del exterior antes de que llegue a los puntos de utilización del mismo en la instalación. Dependiendo del uso que le demos al aire comprimido, es decir

del tipo de aire que necesitemos, se diseña un modelo u otro para filtrar el aire. Se puede poner filtros antes y después del compresor, a la salida del depósito e incluso filtros intermedios. Además se pueden elegir que filtren más o menos según sea necesario para las especificaciones del tipo de aire deseado. [Referencia bibliográfica 9]

Podemos encontrar filtros de polvo, de aceite (necesarios en las industrias alimenticias) y de agua. En la instalación estudiada se disponen de filtros de polvo.

En la Ilustración 14, se muestra un esquema con las principales partes de un filtro:

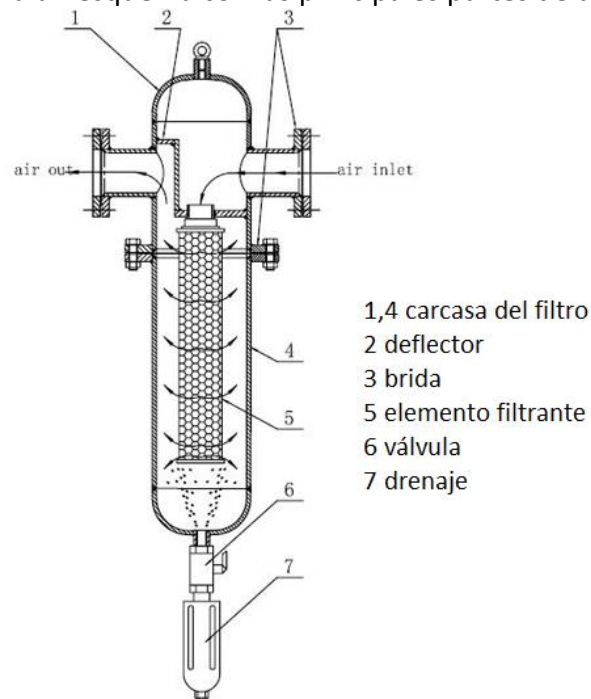


Ilustración 14. Esquema de un filtro

2.4.4 Acumulación del aire

Se recomienda que las instalaciones dispongan de un depósito de aire entre el compresor y la red de distribución y además se deben evitar distancias largas entre el compresor y el depósito.

Las funciones del depósito son:

- Amortiguar las pulsaciones del caudal de aire salido de los compresores alternativos.
- Hacer frente a las demandas puntas de caudal sin que se provoquen caídas de presión.
- Adaptar el caudal de salida del compresor al consumo de aire en la red.

No es recomendable conectar varios compresores a un mismo depósito, mientras si conviene instalar más de uno después del depósito principal.

Para la colocación del depósito en el sistema de aire comprimido se deben tener en cuenta varias opciones:

Si el depósito se pone antes del secador, conseguimos rebajar algo la temperatura de salida. Aunque al no estar seco el aire, hacemos que acumule agua y otras partículas en la parte baja del tanque, que hará que se degrade el depósito. También se ha de tener en cuenta que existe peligro de explosión al mezclar presión, agua, aceites y calor procedentes del almacenamiento.

Es recomendable montar el tanque después del secador y filtro, para almacenar el aire libre de impurezas y agua. De esta manera conservamos el tanque durante más tiempo.



Ilustración 15. Depósito de almacenamiento

La Ilustración 15 muestra un depósito de aire comprimido. En los laterales del mismo se pueden observar la entrada y salida del aire. Además todos los tanques deben disponer de una válvula de seguridad que regulada la presión en su interior, una vez superado este tope el tanque deja salir parte del caudal al exterior y así evita una excesiva presión.

2.4.5 Empleo del aire comprimido según calidad del mismo.

En la Tabla 2 se observa el tipo de aire que se recomienda según la actividad a desarrollar una vez filtrado y deshumificado.

Clase	Descripción	Aplicaciones
IN1 Aire para instrumentos: ISO 1.1.1	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 1.	Instrumentación, proceso, petróleo y gas, química, electrónica.
IN1 inodoro Aire para instrumentos: ISO 1.1.1 inodoro	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite y vapor de aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 1.	Farmacéutica, alimentos y bebidas, estancias limpias.
IN2 Aire para instrumentos: ISO 1.2.1	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 2.	Instrumentación, proceso, petróleo y gas, química, electrónica.
IN2 inodoro Aire para instrumentos: ISO 1.2.1 inodoro	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite y vapor de aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 2.	Farmacéutica, alimentos y bebidas, estancias limpias.
IG4 Aire para aplicaciones industriales: ISO 1.4.1	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 4 o una Humedad Relativa (HR) del 30% (o inferior).	Fabricación general, troquelado de metales, herramientas neumáticas, estampación, montaje, pintura y acabado.
IG4 inodoro Aire para aplicaciones industriales: ISO 1.4.1 inodoro	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite y vapor de aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 4 o una Humedad Relativa (HR) del 30% (o inferior).	Alimentos y bebidas, mezcla de materias primas.
IG6 Aire para aplicaciones industriales: ISO 1.6.1	Eliminación eficiente de partículas sólidas y aceite. Se mantiene el punto de rocío a presión ISO Clase 6 o una Humedad Relativa (HR) del 50% (o inferior).	Aspersión de arena, uso doméstico, construcción.

Tabla 2. Clasificaciones industriales del aire comprimido según uso



Según se pudo observar en la Tabla 1 perteneciente al apartado 2.4, el aire comprimido de tipo IN1 inodoro contiene muy pocas partículas en suspensión puesto que su utilización se emplea en la fabricación de productos que después son consumidas por el hombre. Para el resto de aplicaciones con una calidad del aire de IN1 sería suficiente.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ACERÍA DE SESTAO

En primer lugar se explicará los orígenes de la siderurgia y a continuación se describirá las características acería que se estudia.

3.1 ORÍGENES DE LA SIDERURGIA

En lo que se denomina primer periodo de la siderurgia, la fabricación del hierro se hacía directamente por reducción del mineral en una sola etapa. Se obtenían mediante este proceso partículas metálicas en estado sólido o pastoso, de pequeño tamaño y aspecto esponjoso. Estas partículas de hierro se conformaban martilleándolas en caliente, de forma que se producía su soldadura. Este método, que se comenzó a emplear alrededor de 1.400 años a. de C., ha sido empleado aún en el siglo XX por algunos pueblos primitivos de lugares remotos, aunque en general fue abandonado en el siglo XIX.

El segundo periodo de la siderurgia comenzó a mediados del siglo XIV. En él, la fabricación del hierro se realiza en dos etapas. En la primera se obtiene de los primeros hornos altos la fundición en estado líquido. En la segunda etapa se obtenía el hierro en estado pastoso a partir de la fundición, oxidándola y soldando por fusión las pequeñas partículas en los hornos bajos o de pudelar. La fabricación del hierro en estado sólido o pastoso se abandonó en el siglo XIX.

En 1856 Bessemer descubre la fabricación del hierro y el acero por soplado de la fundición y comienza entonces el tercer periodo de la siderurgia. Por primera vez, el hierro y el acero son fabricados en grandes cantidades y en estado líquido. En 1873 Thomas consigue convertir el hierro colado de alto contenido en fósforo en acero de calidad, empleando un convertidor similar al de Bessemer, pero con un revestimiento básico en lugar del material ácido aplicado hasta entonces. Por último, el desarrollo del horno Martin-Siemens permite la utilización de chatarra en grandes cantidades.

3.2 INTRODUCCIÓN A LA ACERÍA

El acero, según la norma UNE 36-004, es una aleación de hierro y carbono, con un contenido máximo de carbono de un 2%. Por encima de este porcentaje lo que se tiene son fundiciones. Así, el arrabio que se obtiene en el horno alto sería una fundición en estado líquido, puesto que por lo general tiene un contenido de carbono entre el 4,2 y el 4,8%.

Los requerimientos industriales exigen un material que sea simultáneamente duro y con la suficiente maleabilidad para no romperse ante esfuerzos súbitos. El acero cumple todos estos requisitos, por lo que tiene un campo de aplicaciones mucho más amplio que el de las fundiciones.

No se debe pensar en el acero como en un único producto, sino que el rango admisible de carbono y la posibilidad de añadir otros aleantes permiten fabricar un importante abanico de aceros de uso industrial, con distintas características en cada caso.

Por ejemplo, atendiendo al contenido en carbono, los aceros más empleados en la práctica industrial son los que tienen entre un 0,05% y un 0,8%.

La fabricación de acero basada en la fusión de chatarra y en ocasiones de prerreducidos de hierro en horno eléctrico de arco, ha experimentado un crecimiento muy importante en las últimas décadas y supone aproximadamente el 33% de la producción mundial.

Actualmente hay dos métodos de fabricación del acero: la ruta convencional de la siderurgia integral, vía horno alto y acería LD y la ruta del horno eléctrico de arco. La instalación a estudiar emplea horno eléctrico, y esa es la vía que se va a explicar.

La acería que a continuación se presenta tiene las siguientes áreas: **acería eléctrica y unidad compacta**.

3.3 ACERÍA ELÉCTRICA

La acería eléctrica es la instalación donde el arrabio llega y se transforma en acero, se ajusta su composición y pasa a la unidad compacta donde toma la forma deseada y solidifica.

La constituye el horno eléctrico de arco, en el cual se lleva a cabo la fusión de la chatarra.

3.3.1 El horno eléctrico de arco

La fabricación de acero mediante el horno eléctrico de arco está basado en la fusión de chatarras, aunque se emplean también prerreducidos e incluso algo de arrabio. Aún no siendo lo normal, en algunas acerías el porcentaje de arrabio empleado puede llegar a ser del 50%.

La energía que se emplea para la fusión no es de origen químico sino que proviene de un arco eléctrico, generado entre dos electrodos que se introducen por la parte superior del horno y funden la chatarra contenida en el horno.

La Ilustración 16 muestra el proceso que lleva a cabo la acería eléctrica.



Ilustración 16. Acería eléctrica.

3.3.2 Componentes de un horno eléctrico

Los elementos que componen un horno eléctrico de fusión son los siguientes:

a) Cuba del horno

La cuba del horno suele ser cilíndrica y estar recubierta de material refractario. Su diámetro determina el peso de la colada que es capaz de albergar y oscila entre 50 y 150 toneladas. La puerta del horno se encuentra frente a la zona de colada y permite desescoriar y operar durante el proceso de fusión. La colada se puede realizar mediante el vuelco de la cuba o con el sistema EBT que consiste en una desembocadura excéntrica en el fondo del horno con lo que se consigue reducir el nitrógeno y escoria, que se elimina por el lado contrario, en el acero líquido.

b) Electrodo

Los electrodos que conforman el horno eléctrico son de grafito de alta pureza, se emplea este material porque soporta altas temperaturas y es buen conductor eléctrico. Son los encargados de hacer saltar el arco y transportan de este modo la energía en el horno. Son introducidos al horno por un orificio de gran diámetro hecho de material refractario que se recibe el nombre de bovedilla. Cuando los electrodos se encuentran cerca de la chatarra se forma un circuito eléctrico entre ellos que proporciona la energía térmica necesaria para fundir el material que contiene.

Si la corriente empleada en el horno es alterna entonces se deben instalar tres electrodos, mientras que si la corriente es rectificadora entonces suele haber uno o dos electrodos. El diámetro habitual suele oscilar entre 600 y 800 mm, según la energía del arco, y entre 1,5 y 3 metros de longitud. Según se va desgastando el grafito se le va colocando un nuevo electrodo en el extremo del arco, para ello se debe interrumpir la corriente. Esta operación recibe el nombre de “niplar”.

Los electrodos son soportados por unos portaelectrodos y su accionamiento cuenta con un sistema de regulación electrónica y de accionamiento hidráulico, que permite mover los electrodos a gran velocidad y regular así el arco eléctrico, manteniendo constante la corriente o impedancia.

El consumo de los electrodos se mide en kilogramos de grafito por tonelada fundida, suele estar entre 1-2 kg de grafito/T de carga fundida.

c) Refractarios

El revestimiento de material refractario para proteger la el horno eléctrico presenta un problema, este es que tiene un desgaste irregular. Mientras las paredes laterales aguantan unas 1000 coladas las bóvedas sólo aguantan 400.

Este diferente desgastaste se debe no solo a la radiación del arco, sino también por la erosión del polvo que se expulsa por el sistema de escape y por las tensiones causadas por el enfriamiento repentino, al desplazar la bóveda para su carga y calentamiento posterior por contener de nuevo la colada.

Los recipientes dónde se fundirán los metales preparados para una alta resistencia se construyen de ladrillos básicos impregnados de alquitrán y con una capa de magnesia apisonada. Para las paredes se puede emplear ladrillos de magnesia o de corno-magnesia. También se usan los de alto contenido en alúmina o carbón ligado con magnesia. Los refractarios de las bóvedas son de alúmina de alta pureza.

Se ha generalizado la práctica de cubrir las paredes con paneles tubulares de agua, como refrigerante. Éstos se sitúan en el refractario, detrás de los puntos calientes. Debe emplearse agua desmineralizada, con el fin de evitar que se depositen sustancias sobre las tuberías que la contienen.

3.3.3 Esquema de las partes de un horno eléctrico

En la Ilustración 17. Esquema del horno eléctrico, se muestra la sección de un horno eléctrico. A la izquierda del mismo se observa el transformador, seguido los cables que conectan con los electrodos. También se puede apreciar la bóveda y en su interior la chatarra fundida.

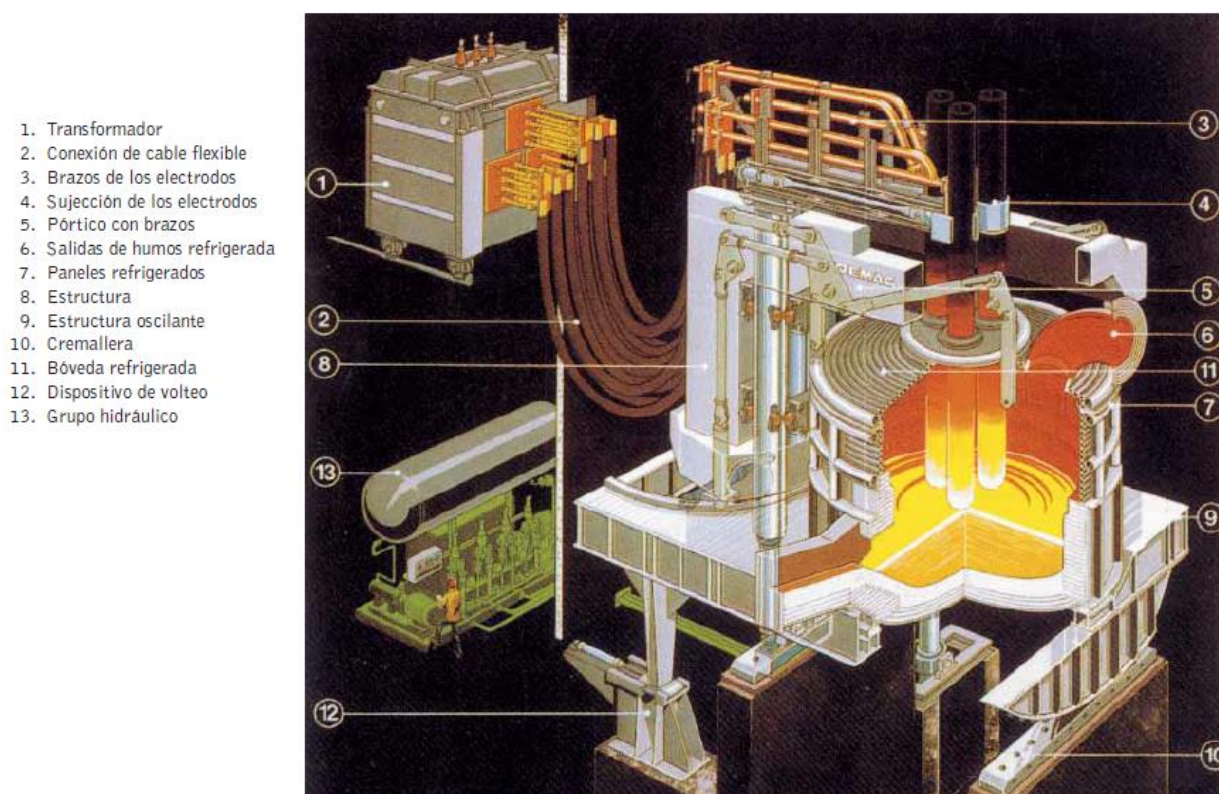


Ilustración 17. Esquema del horno eléctrico

3.4 EL PROCESO

El proceso comienza al cargar la chatarra en el horno que tiene una apertura en la parte superior de la bóveda, se debe inclinar ligeramente el horno hacia atrás o hacia el frente para facilitar el llenado.

La chatarra es transportada en cestas que se abren por la parte superior, después se colocan en posición de descarga esperando al momento adecuado para proceder a su descarga. Se debe tener todo automatizado y medidos los tiempos para no incurrir en pérdidas de energía.

Además de chatarra o hierro prerreducido las cestas incluyen fundentes y agentes carbonosos que aportan el carbón necesario para la fusión. Para asegurar una buena ignición es recomendable que en la parte superior esté constituida por chatarra ligera. Después de cargar una cesta en el interior de la bóveda comienza la fusión. Los electrodos bajan hasta tocar la primera capa de chatarra, según se van fundiendo las primeras capas y desciende el nivel de carga los portaelectrodos van descendiendo controlados de manera automática.

Antes de fundir por completo la carga inicial, se ha desocupado un volumen considerable en el horno, por lo que se debe recargar con nuevas cestas de chatarra. Depende de la capacidad del horno y de la densidad aparente de la chatarra este proceso se puede repetir hasta tres veces.

La primera carga se hace de chatarra ligera, que sirve como colchón al fondo. Las piezas más pesadas se deben colocar en el centro. La chatarra mediana y ligera se coloca alrededor de las piezas pesadas y así se protege el refractario de los arcos tan intensos entre los electrodos y las piezas pesadas.

Cuando todas las cestas de chatarra se han fundido, el calentamiento continúa durante el proceso que se denomina “afino”, en el cual se superan los 1.650° C. El afinado consiste en una fase de oxidación y defosforación mediante la inyección de oxígeno.

El resto del afinado se completa en la metalurgia secundaria. Por último se realiza la colada del acero líquido ya sea volcando o mediante el EBT ya descrito.

3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL HORNO ELÉCTRICO

Las razones que explican la rápida expansión de este método en los últimos años son:

- Posibilidad de emplear todo tipo de cargas: chatarra, prerreducidos, arrabio, etc.
- Alta productividad: con un solo horno es posible mantener una máquina de colada continua.

- Baja inversión respecto a la ruta de los hornos altos.
- Los hornos eléctricos permiten una sencilla extracción de la escoria sobrante.
- Posibilidad de automatizar y programar el proceso de fusión.
- Proceso de alta eficiencia.

Mientras que los inconvenientes del uso del HEA son:

- Gran dependencia del mercado de la chatarra.
- Posibilidad de contaminar el acero con elementos residuales de la chatarra.
- Altos contenidos en nitrógeno.
- Se requiere una fuerte inversión para evitar los ruidos provenientes del vertido de la chatarra en las cubas.

3.6 METALURGIA SECUNDARIA

El acero líquido obtenido en el HEA no es el producto final, antes de pasar a la solidificación es sometido a procesos que ajustarán su composición, temperatura y limpieza incluirán características imprescindibles en sus propiedades mecánicas finales. Este proceso de afinamiento se denomina metalurgia secundaria.

La metalurgia secundaria permite obtener las calidades de acero que exigen los clientes, limitando el contenido en azufre, oxígeno, hidrógeno e inclusiones no metálicas y se realiza en el horno cuchara que explicamos a continuación.

3.6.1 HORNO CUCHARA

El afinamiento de las características deseadas por el cliente se realiza en el horno cuchara. Existen otros métodos pero tienen el inconveniente de la caída en la temperatura del baño durante su proceso.

Según lo comentado con anterioridad, se propuso la idea de realizar esta segunda metalurgia en la propia cuchara, la cual incorpora un sistema de calentamiento que permite compensar el descenso de la temperatura.

Las operaciones que el horno-cuchara realiza son:

- Calentamiento del acero y homogeneización de su temperatura.
- Desoxidación y desulfuración.
- Adición y encaje de elementos de aleación.
- Homogeneización de la composición.
- Decantación y separado de inclusiones.

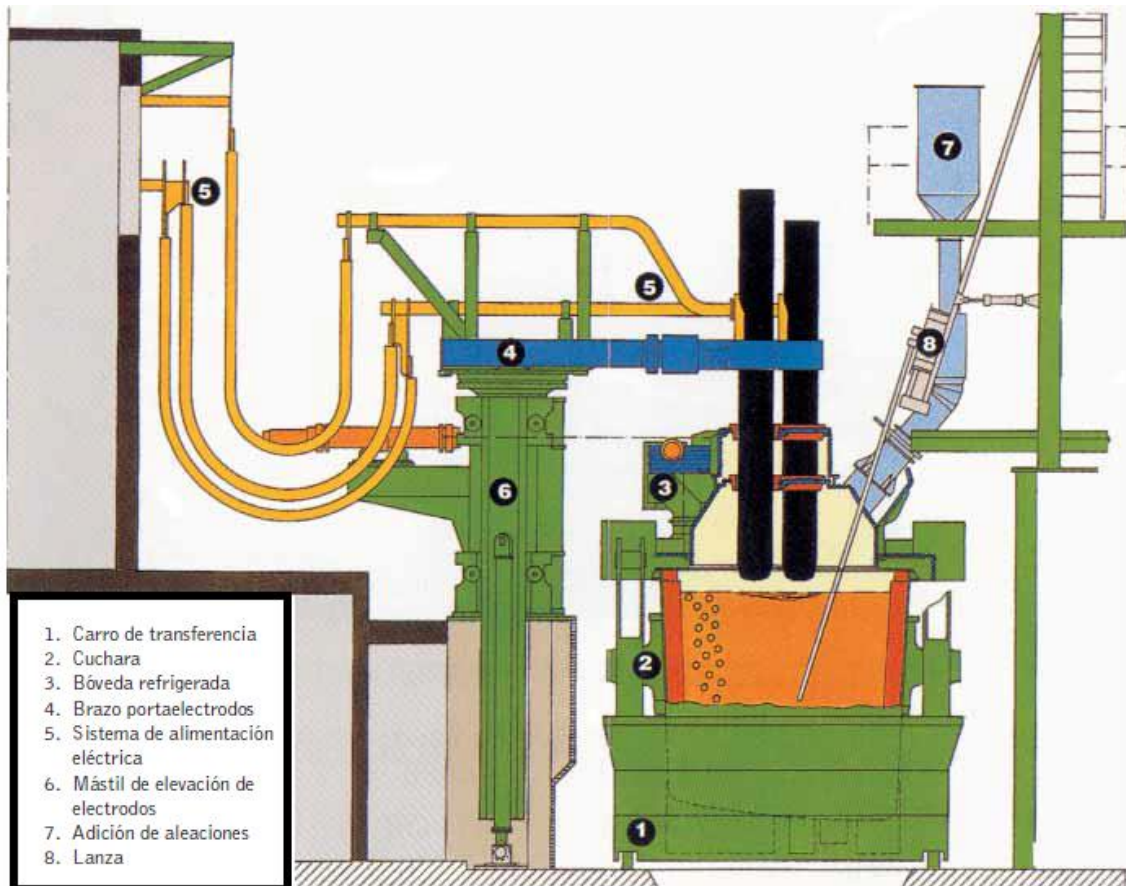


Ilustración 18. Horno cuchara

El horno cuchara (Ilustración 18) consta de una bóveda y tres electrodos en la parte superior de la cuchara, con lo que se dispone de un pequeño horno para calentar el acero.

Su funcionamiento se basa en el calentamiento a través de los electrodos, inyección de argón o nitrógeno por el fondo y la creación de una atmósfera no oxidante.

La instalación se completa con un sistema de tolvas de ferroaleaciones y unos automatismos que toman muestras y temperatura.

Después de pasar por el horno-cuchara se consigue una excelente homogenización y control de la composición y la temperatura. También se llega a niveles muy bajos en azufre y en gases, muy bien desoxidados y limpios de inclusiones.

A continuación la colada continua pasa por unos moldes (lingoteras) que los convierten en lingotes y se transportan hasta el tren de laminación que veremos a continuación.

La siguiente imagen, Ilustración 19, muestra el moldeado y enfriado de la colada continua en slabs, para su posterior transporte en la cadena de fabricación.

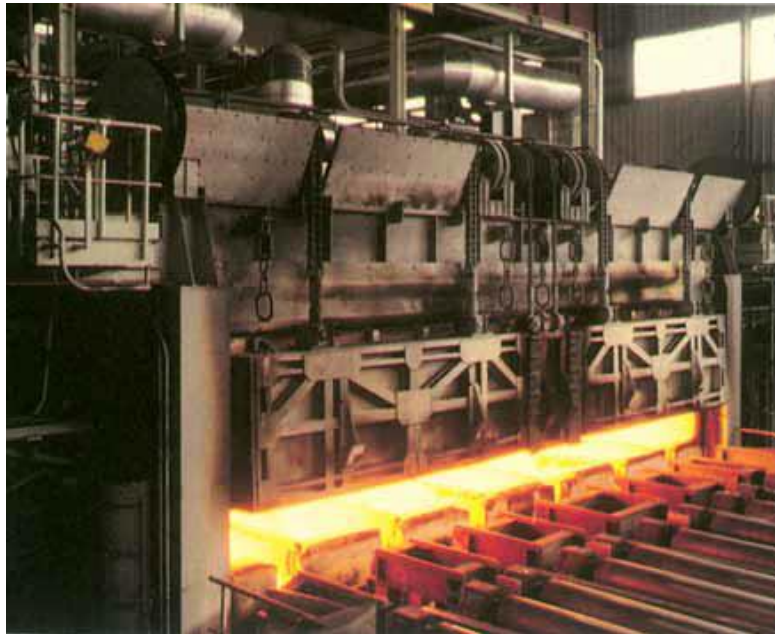


Ilustración 19. Proceso de moldado y enfriado (slab)

3.7 UNIDAD COMPACTA

Después de formarse la colada continua con las especificaciones necesarias de morfología, se convierte esta en lingotes y después pasa a un tren de laminación en caliente dónde se le da forma y espesor correcto y finalmente se obtienen las planchas de bobina de acero. A continuación se describe el tren de laminación dónde tienen lugar estos procesos.

3.7.1 Trenes de laminación

Un tren de laminación se define como una máquina que trabaja por presión entre sus cilindros rotativos dando forma de plancha el material que recibe. También en este proceso se incluye otras operaciones auxiliares como son el transporte, almacenaje, manipulación y estas tareas también son realizadas por el tren de laminación.

La parte fundamental en los trenes de laminación es la “caja” y a su vez esta la componen los cilindros de laminación y la estructura soporte llamada “castillete”

Las máquinas que forman parte de la laminación se agrupan según la función que realizan:

a) Laminación del metal. Se consigue en varias etapas y sus partes son:

- Mecanismo ejecutante, compuesta por una o varias cajas de cilindros.
- Mecanismo de transmisión que lo conforman engranajes, acoplamientos, alargaderas, etc.
- Motor eléctrico que impulsa los cilindros.

b) Operaciones auxiliares como hemos comentado antes. Se incluyen rodillos y otros medios de transporte en una cadena de fabricación con aire comprimido como tecnología principal.

El tren de laminación recibe del proceso anterior los lingotes que posteriormente serán debastados, acabados y convertidos en bobinas de acero.

En el siguiente aparatado describimos el tren de laminación en caliente del que dispone la planta.

3.7.2 Tren de laminación en caliente

El tren de bandas en caliente transforma los slabs de espesor aproximado entre 220-250 mm y tras pasar por el tren de bandas en caliente pasa a tener un espesor de 1,5-20 mm.

El tren de bandas en caliente transforma los slabs o desbastes planos procedentes de la colada continua en bobinas de chapa de ancho y espesor determinados por las especificaciones del cliente.

Con este proceso se consigue controlar la calidad y dimensiones del producto final.

El tren que posee la planta a estudio es el siguiente que se muestra en la Ilustración 20. Tren de laminación.

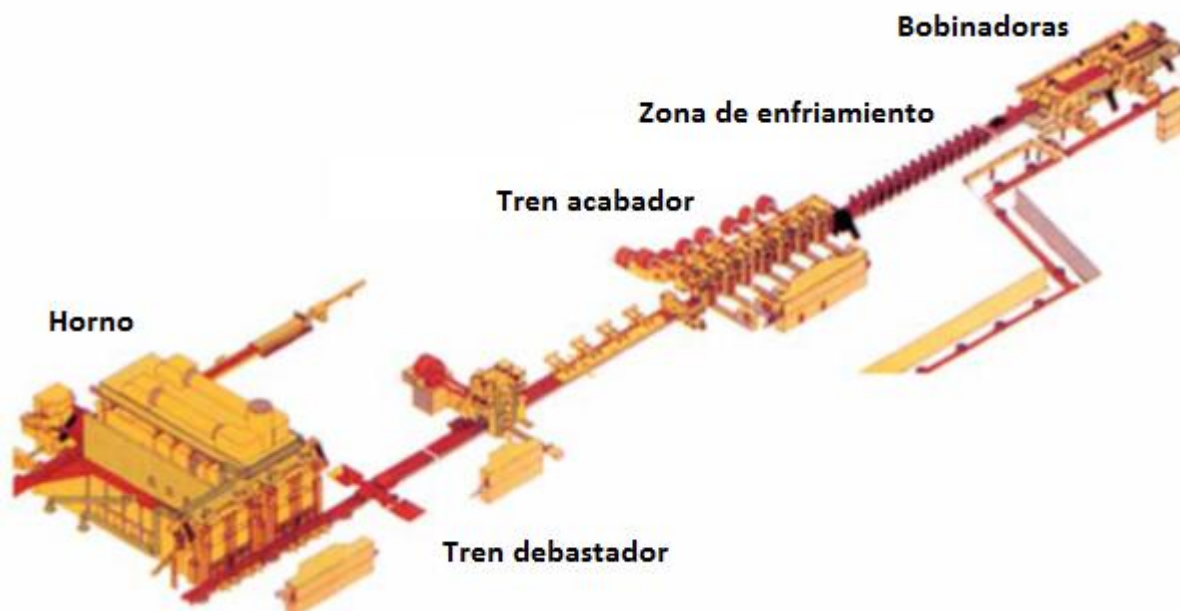


Ilustración 20. Tren de laminación

En la anterior imagen (Ilustración 20) se muestra el esquema del tren de laminación semicontinuo que posee la acería. De izquierda a derecha se observan las distintas zonas del tren de laminación en caliente: el horno, tren debastador, tren acabador, la zona de enfriamiento y finalmente las bobinadoras.

A continuación se describe las partes que componen el conjunto del tren detenidamente:

a) Zona de hornos

Esta zona incluye un horno dónde se eleva la temperatura del slab debido a que la temperatura de desbaste debe ser superior a la temperatura de recristalización. Se eleva la temperatura de las los lingotes ya cristalizados hasta los 1200 °C para conseguir laminar los slabs.

Es recomendable que los hornos sean de tipo continuo, lo que favorece la carga y descarga sin interrumpir el proceso de laminado.

b) Zona devastadora

La zona devastadora se sitúa entre el horno de recalentar y el tren acabador. En esta zona se realizan las siguientes funciones: romper y eliminar la cascarilla, y laminar el desbaste hasta obtener chapones (planchas de espesor intermedio entre el slab y la chapa final).

La primera operación consiste en eliminar la cascarilla que se forma sobre el desbaste por el enfriamiento y posterior recalentamiento. Esta cascara posee varias capas que se debe de tener constancia de que son eliminadas.

En primer lugar un rompedor vertical aplica una fuerza transversal al sentido de la marcha del slab, una vez rota la cascarilla esta se desprende porque se rocía el bloque con agua a alta presión tanto en la parte superior como la inferior. La cascarilla se cuela en un canal que discurre por el tren de laminación.

Al entrar el slab en la caja horizontal de desbaste convierte estos en chapones. La caja posee dos cilindros canteadores en la entrada y salida.

El número de pasadas necesarias que sufrirá el bloque depende de las medidas del desbaste y del chapón que se desee obtener, también influyen el tipo de acero y la temperatura de laminado. Las repeticiones oscilan entre 5-9.

Una vez se termina el proceso devastador pasamos a la zona de acabado.

c) Zona acabadora

Este tramo va desde el tren acabador hasta el final de las mesas de enfriamiento. Una vez obtenido el chapón se obtiene el espesor deseado para la bobina con una sola pasada por el tren acabador y se despunta. A la entrada del tren acabador se lleva acabo el despuntado, este trabajo lo realiza una tijera de bielas. Se recorta la cabeza y la cola del chapón y a continuación pasa al tren acabador.

A la salida del tren acabador se rebaja la temperatura con unas duchas que consiguen la temperatura ideal del bobinado, este hecho pertenece a la zona de enfriamiento.

Este tipo de trenes suele estar formado por cajas cuarto, lo que significa que reducen su espesor progresivamente. A la entrada es más espeso que a la salida y como la masa es la misma a la entrada que a la salida; la velocidad debe ir aumentando también.

La primera caja del tren acabador (F0) es la antigua caja horizontal del tren desbastador adaptada al tren acabador, con cilindros de mayor diámetro que los del resto de cajas, que serán prácticamente iguales entre sí.

d) Zona de enfriamiento

En la zona de enfriamiento se ha de reducir la temperatura del bobinado, para ello se dispone de un sistema de refrigeración organizado en secciones con distinto número de cortina de agua y colectores. La temperatura se regula con el caudal de agua empleado.

e) Zona de bobinadoras

La zona de bobinadoras comprende desde el final de las mesas de enfriamiento hasta el final del proceso. En la Ilustración 21, se muestra una representación de las bobinadoras.

Durante el recorrido de la banda por las mesas de enfriado no se pueden formar ondas, por lo que se fija una velocidad máxima de enhebrado dependiendo de las características de las mesas de rodillos.

Para cada banda se ajustarán todos los parámetros de manera que la bobina se forme correctamente. Las bobinadoras constan de los siguientes elementos:

- Guías de entrada que permiten un buen posicionamiento de la banda.
- El rodillo pisón que se encuentra entre las guías y los rodillos arrastradores y tiene como tarea mantener la banda con la tensión adecuada. Tiene un mecanismo neumático que asciende y desciende dependiendo del espesor.
- Los Rodillos arrastradores impulsan la cabeza de la banda hacia el mandril de la bobinadora y provocan la tensión de la banda entre ellos y el mandril.
- El mandril sirve de eje de la bobina y efectúa el bobinado. Dispone de un sistema de expansión múltiple para poder enhebrar las primeras espiras y dar forma a la bobina y después se contrae para la extracción de la misma.
- Los rodillos de bloqueo ajustan las primeras espiras de la bobina al mandril. Al final de la bobina mantienen apretadas las últimas espiras.
- El carro extractor es el encargado de recoger las bobinas del mandril una vez este se contrae y las lleva al volteador. Además tiene un tope de retención y dos brazos que recogen la bobina del carro y la depositan en el transportador.
- Las flejadoras su función es realizar un flejado circunferencial y de esta manera evitar que se aflojen las espiras durante el transporte.

- La zona de salida de las bobinadoras se voltea la bobina se deposita en un transportador y se lleva a un parque de enfriamiento. Este transportador posee equipos de control de peso, marcadora automática y prensa de bobinas.

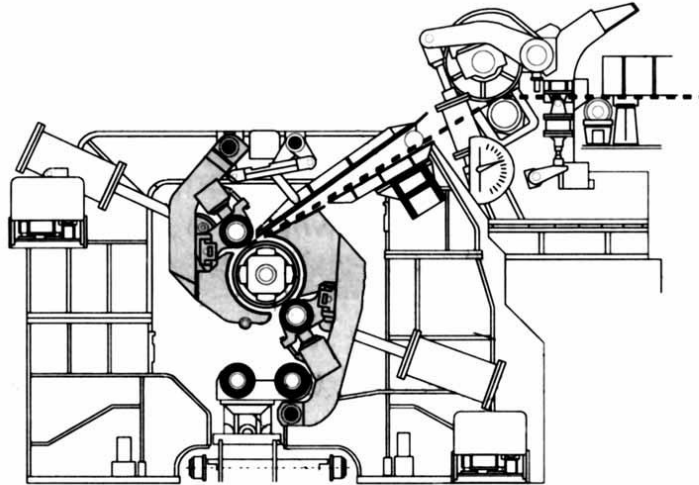


Ilustración 21. Zona de bobinadoras

Es en esta última zona de la salida de las bobinas dónde se emplea la mayor parte del aire comprimido de la instalación. El resto del aire se emplea en la apertura/cierre de válvulas neumáticas y mangueras de aire para limpiar la instalación.

El grueso del aire comprimido empleado en la planta se utiliza en este tren semicontinuo, por ejemplo se emplea para accionar las cintas transportadoras o para obtener agua a presión y limpiar los chapones. [Referencia bibliográfica 2 y 8]

4. ANÁLISIS DE LA PLANTA

Después de explicar la ubicación, dimensiones y funcionamiento de la planta en el punto anterior, se estudia en detalle la configuración de la planta, las medidas tomadas y se representan y explican las mismas.

4.1 ESQUEMA GENERAL DE LA RED DE AIRE COMPRIMIDO DE LA PLANTA

La acería consta de dos salas de aire comprimido además de sus correspondientes redes de aire comprimido. Éstas generan todo el caudal de aire que la planta demanda para el funcionamiento de la misma. En la sala 1 se produce el aire comprimido necesario para el funcionamiento de la cinta transportadora, que desplaza las bobinas del planchón de acero una vez tratadas, modeladas y enfriadas hasta el almacén.

En la sala 2 se genera el aire comprimido necesario para el funcionamiento de herramientas accionadas por aire y válvulas neumáticas.

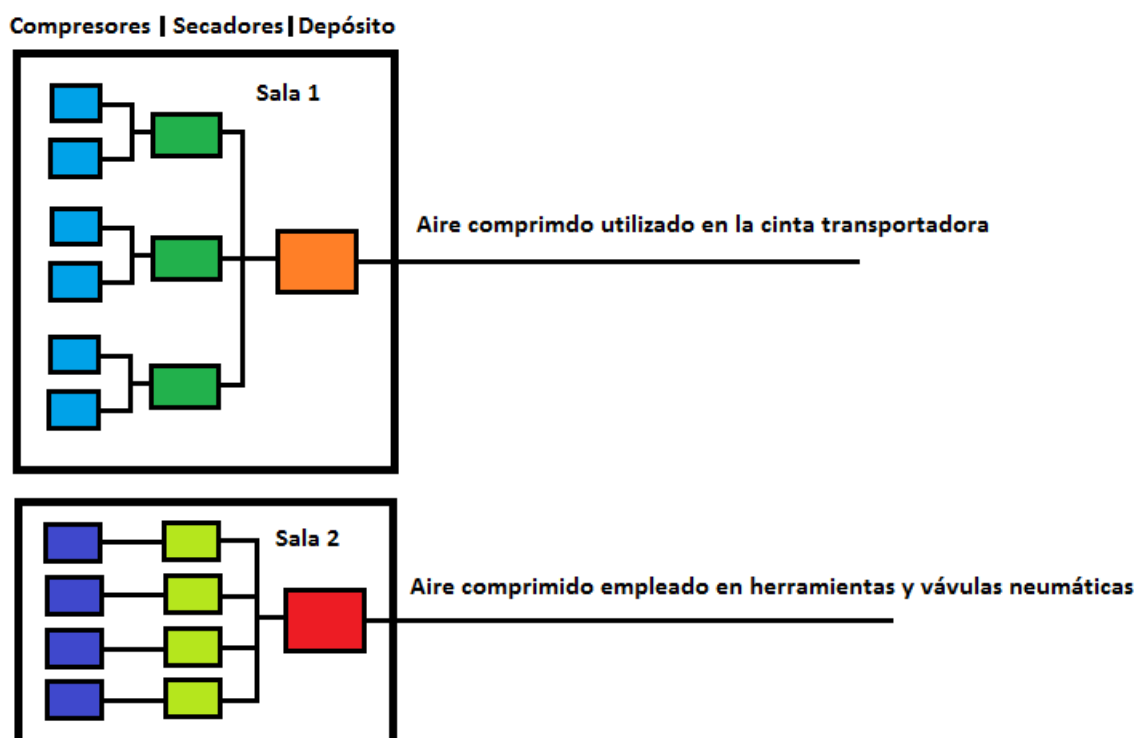


Ilustración 22. Esquema de la instalación de aire comprimido

En la Ilustración 22 se muestra un esquema de los componentes de cada una de las salas: compresores, secadores y depósito.

Esta primera sala está compuesta por seis compresores de tornillo fijos, tres secadores encargados de retirar el agua que posee el aire y por último un depósito que evita los

cambios bruscos de presión del sistema. Esta red de aire de la sala 1 es capaz de generar hasta 215,64 m³/min.

En la segunda está formada por cuatro compresores de tornillo y tecnología fija, cuatro secadores y un depósito común. En esta sala se genera un caudal máximo de 52,44 m³/min. Este volumen de aire es mucho menor en comparación con la primera, debido al uso que se le va a dar.

4.2 MEDIDAS TOMADAS

Las medidas tomadas en la planta son de caudal, presión, punto de rocío e intensidad.

El caudal es el volumen de aire comprimido que pasa en todo momento por las tuberías de la instalación y que permite el funcionamiento de válvulas neumáticas, herramientas, sopladores y cintas transportadoras. El caudal se midió en la tubería que sale de cada compresor. Con esta medida individual de cada compresor se conoce el funcionamiento de cada máquina.

Es necesario conocer la presión, debido a que cada componente que requiere de aire comprimido funciona con una presión concreta. Además una disminución de la presión, nos puede marcar un problema serio en la línea. Las medidas se toman a la salida de cada compresor.

El punto de rocío es la temperatura del aire que circula por la tubería, si se alcanza en el exterior de la tubería esta temperatura, entonces se forman gotas de vapor muy perjudiciales para el correcto funcionamiento de la instalación. Se recoge las medidas de temperatura del aire que fluye por la instalación a la salida de cada compresor.

La intensidad medida en bornes del motor de los compresores se toma para obtener una curva de funcionamiento del compresor. Según consuma más o menos corriente, se sabe en qué punto de funcionamiento se encuentra el mismo. Se mide en bornes del motor con unas pinzas amperimétricas y así se obtiene la intensidad. Una vez recogidas estas medidas de intensidad, se convierte en medidas de potencia a través de la siguiente fórmula:

$$P = \frac{I \times V \times \cos\alpha \times \sqrt{3}}{1000} \text{ (kW)}$$

Siendo:

$\cos\alpha$: el factor de potencia del motor del compresor. Se asume como un valor correcto de $\alpha = 0,9$.

I: Intensidad recogida (A).

V: tensión en bornes del motor, en este caso los motores funcionan a 380 voltios (V).

Estas medidas se llevan a cabo con una maleta que contiene un caudalímetro VP_FLOW_SCOPE que mide caudal, presión y punto de rocío y unas pinzas amperimétricas que registran intensidad a través del aparato de medida DATA_LOGGER.

El caudalímetro es un aparato de medida que recoge medidas de presión, caudal y temperatura. El medidor de caudal dispone de un sensor de velocidad del aire que al introducir el diámetro de la tubería es capaz de calcular el caudal que está pasando por ella. Además dispone de un medidor de temperatura para obtener la calidad del aire del sistema. También cuenta con un sensor de presión de la línea.

Las medidas tomadas por el caudalímetro se recogen haciendo un picaje en la tubería del sistema de aire comprimido que se quiere medir, con unas indicaciones precisas para que la medición sea la correcta, después se introduce el caudalímetro.

Una vez recogidos estos datos que suelen estar en torno a los 30.000 y 40.000, se pasan a una tabla de cálculo, se tratan, grafican y analizan.

En la Ilustración 23 Ilustración 23. Disposición de los aparatos de medida se observa la disposición de los aparatos de medida en cada sala para la correcta recogida de datos. Se observa que se instala una sonda que mide caudal, punto de rocío y presión y otra sonda que mide intensidad en cada compresor.

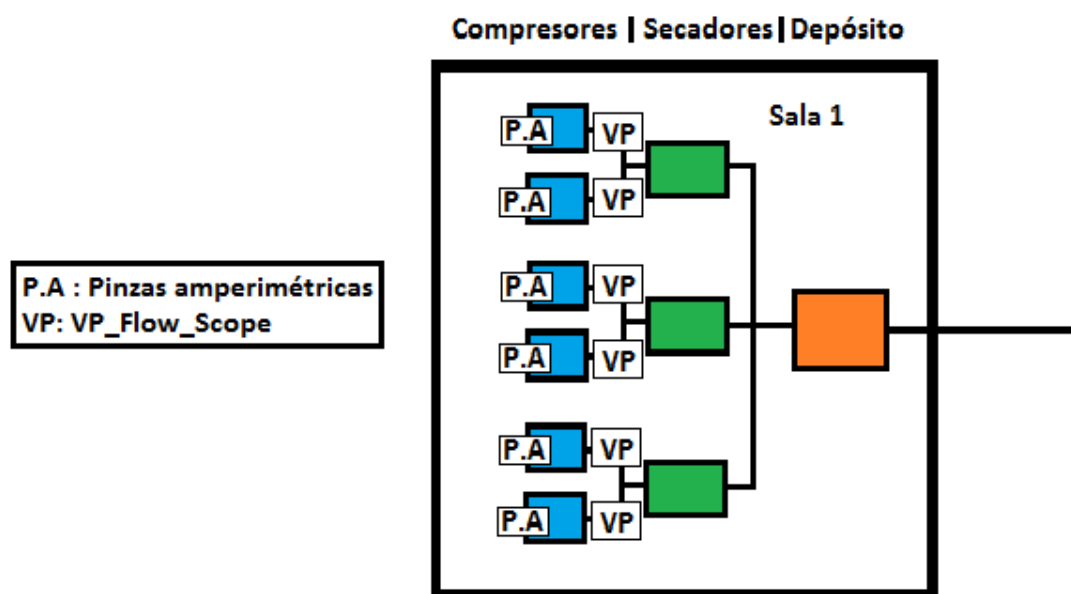


Ilustración 23. Disposición de los aparatos de medida

La Tabla 3, que se muestra a continuación, se corresponde con una tabla de Excel que muestra los datos recogidos, volcados a una tabla de cálculo y preparados para ser tratados y graficados. Se observa que cada columna es una medida diferente del aire que genera cada compresor en la instalación. También queda registrada la hora de la toma de datos para poder graficar los datos respecto al tiempo.

	C	D	F	G	H	K
1	Fecha hora	Temperatura(°C)	Punto de condensa(°Ctd)	Presión (bar)	Flujo_final(m³/min)	Potencia (kW)
2	17/04/2013 10:23	28,0	-0,2	6,80	126,9	948,5
3	17/04/2013 10:24	28,0	0,0	6,72	133,1	945,5
4	17/04/2013 10:25	28,0	0,4	6,52	137,8	935,6
5	17/04/2013 10:26	28,0	-0,3	6,21	141,6	922,0
6	17/04/2013 10:27	28,2	-1,2	6,03	140,3	946,5
7	17/04/2013 10:28	28,3	-1,3	6,17	154,7	1057,1
8	17/04/2013 10:29	28,3	-0,3	6,28	157,3	1076,5
9	17/04/2013 10:30	28,3	0,7	6,33	155,8	1064,1
10	17/04/2013 10:31	28,3	0,5	6,37	151,8	997,0
11	17/04/2013 10:32	28,3	-0,7	6,15	139,8	937,5
12	17/04/2013 10:33	28,4	-1,2	6,06	151,0	1017,6
13	17/04/2013 10:34	28,4	-0,6	6,21	156,2	1054,3
14	17/04/2013 10:35	28,4	0,3	6,28	156,1	1060,0
15	17/04/2013 10:36	28,4	0,2	6,36	157,8	1068,7
16	17/04/2013 10:37	28,4	-0,7	6,34	147,9	969,0
17	17/04/2013 10:38	28,5	-1,1	6,10	140,2	921,3

Tabla 3. Datos recogidos de la instalación

4.3 RESULTADOS PARA LA SALA 1

A continuación se muestra los resultados obtenidos y el estudio de las medidas recogida en cada una de las salas.

En la Tabla 4 se ofrecen los datos técnicos del compresor fijo 200.

Compresores rindiendo según diseño	Fijo 200	Fijo 200 + 7 % eficiencia
CONDICIONES AMBIENTALES		
Presión ambiente	1,101	1,101
Presión en brida admisión	0,98	0,98
Temp en brida de admisión (°C)	20	20
Humedad relativa (%)	0	0
Temperatura agua de refrigeración (°C)	20	20
DATOS DE RENDIMIENTO		
Presión descarga bar (g)	7	7
Potencia eléctrica de mínima carga (kW)	/	/
Caudal mínima carga (m³/min)	/	/
Potencia eléctrica plena carga (kW)	208	222,56
Caudal admisión plena carga (m³/min)	35,94	35,94
Potencia al eje específica a plena carga (kW/(m³/min))	5,8	6,2

Tabla 4. Hoja de datos de los compresores actuales

[Referencia bibliográfica 14]

Tal y como se ha comentado anteriormente, en la Tabla 4, se muestran los datos de funcionamiento de los seis compresores Fijo 200 instalados en la sala. Son máquinas con tecnología de tornillo y su funcionamiento es fijo. En esta tabla se observan dos columnas con datos del compresor, la primera hace referencia a los datos de fábrica y la segunda, con la que se va a trabajar, hace referencia a un compresor con pérdida de eficiencia. Para denotar esta situación, se ha incrementado un 7% la potencia consumida por el compresor. Se observa que la potencia máxima es 222,56 kW y que el caudal que genera el compresor es de 35,94 m³/min.

A continuación se muestra en la Ilustración 24, el funcionamiento del compresor fijo 200. La línea azul es el funcionamiento del compresor con un comportamiento de fábrica, es decir nuevo. En rojo se observa un compresor con un 7% de pérdida de eficiencia por el paso del tiempo en el compresor.

El gráfico denota el mayor consumo del compresor viejo (rojo) debido a la pérdida de eficiencia causada por el deterioro del motor del compresor.

Para los cálculos de potencia consumida se emplea la línea roja, y de esta manera simulamos unos compresores que no funcionan de manera óptima debido al paso del tiempo.

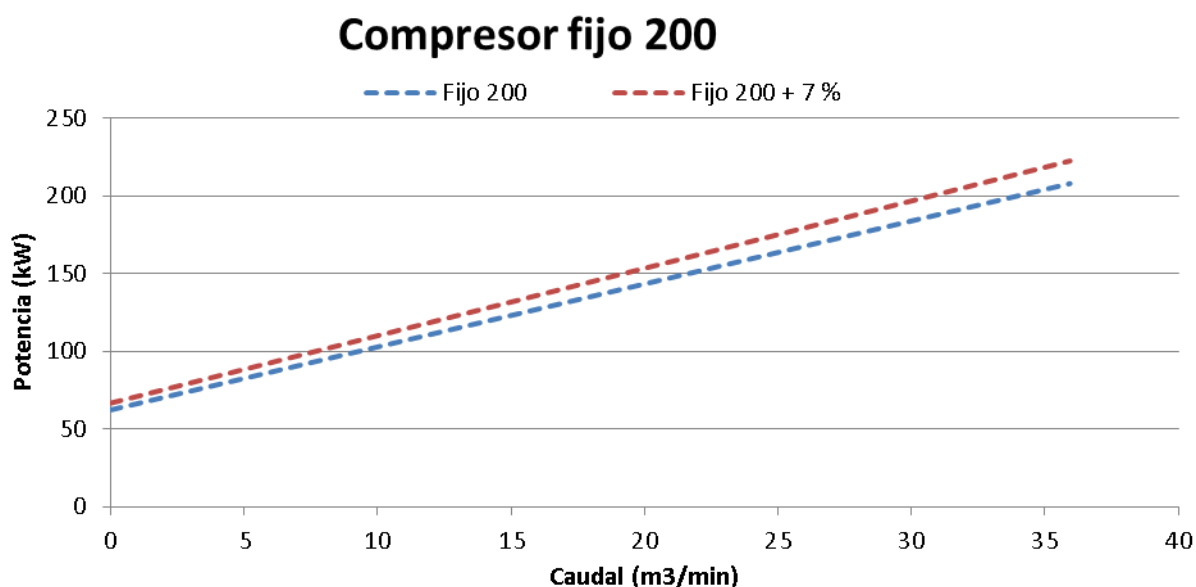


Ilustración 24. Modos de funcionamiento de los compresores

4.3.1 Gráficas elaboradas a partir de los datos recogidos

Los siguientes puntos hacen un análisis de los datos recogidos en la sala 1.

a) Gráfica de caudal y presión para la sala 1

En la Ilustración 25, se muestra una representación del caudal y presión del aire comprimido de la sala 1.

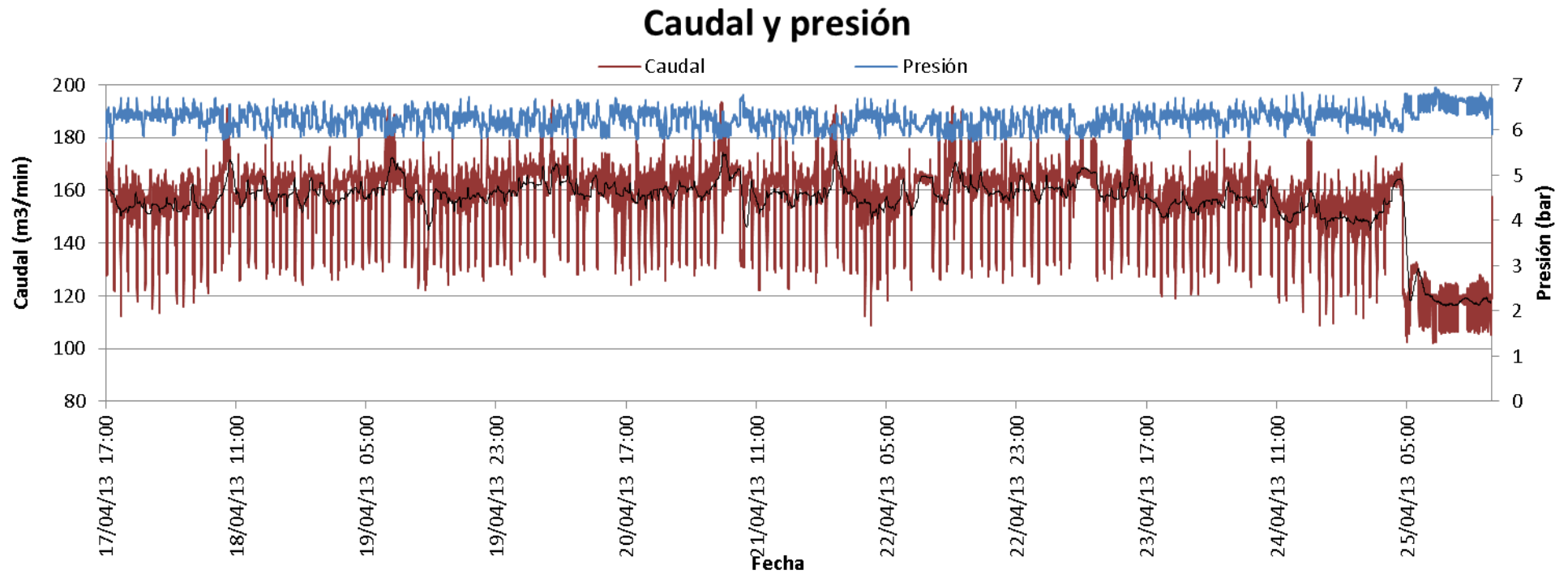


Ilustración 25. Caudal y presión de la sala 1

b) Gráficas de potencia de cada compresor

La siguiente Ilustración 26, representación muestra la potencia medida los compresor 1, 2 y 3.

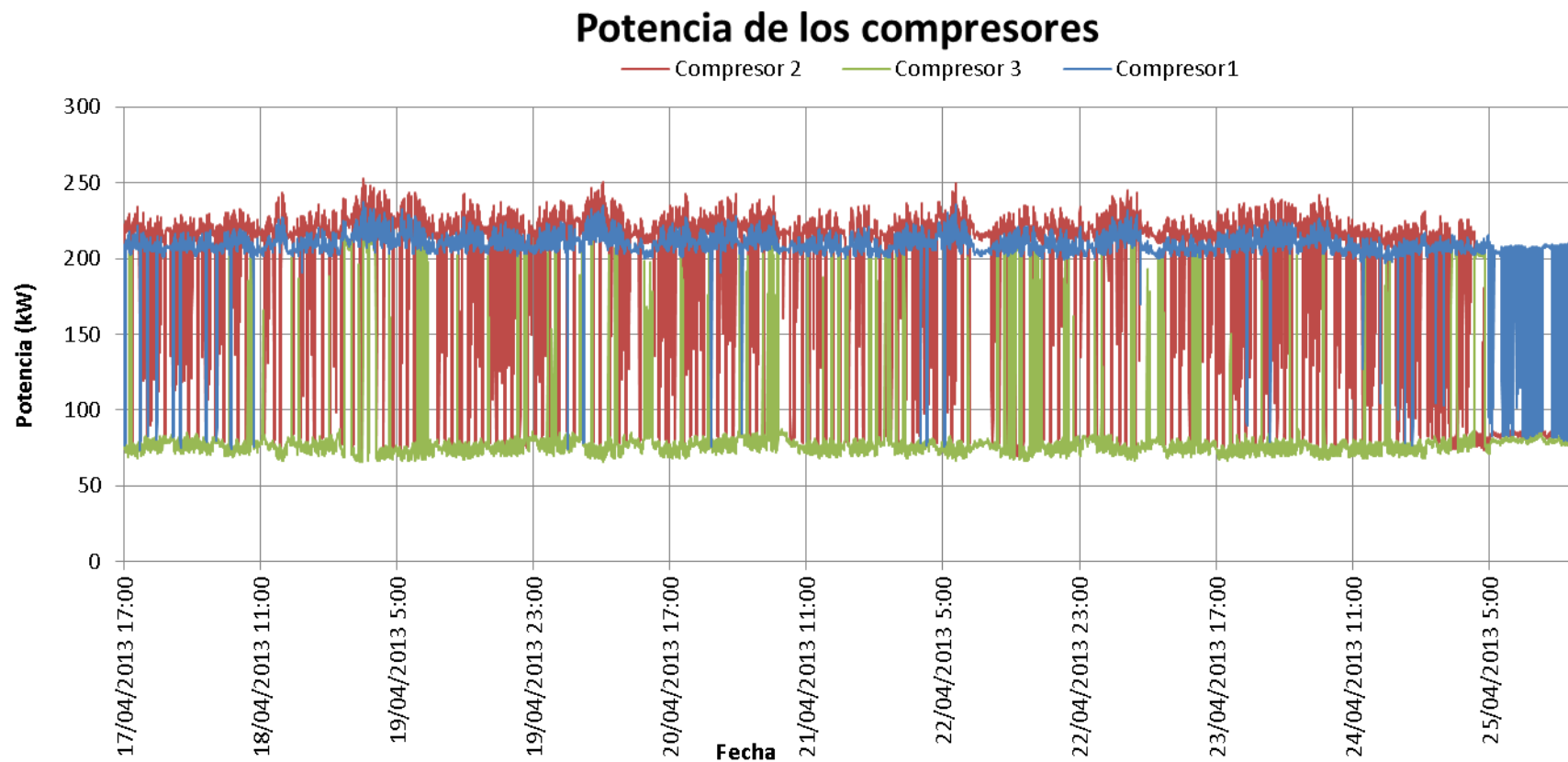


Ilustración 26. Potencia de los compresores 1, 2, y 3.

La gráfica siguiente, Ilustración 27, refleja la potencia consumida por los compresores 4, 5 y 6.

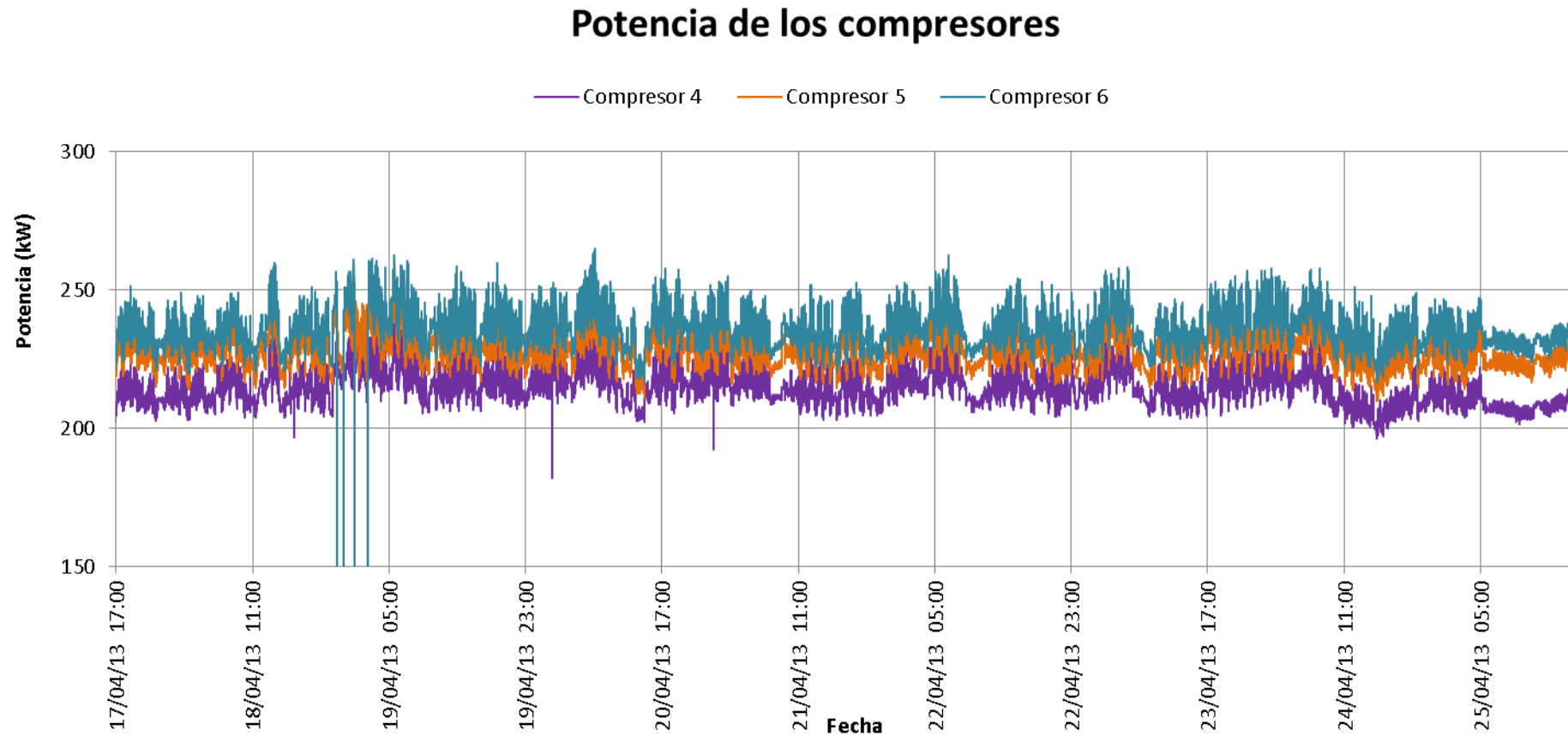


Ilustración 27. Potencia de los compresores 4, 5 y 6

4.3.2 Porcentaje de funcionamiento

En la Ilustración 28, se observan los porcentajes de los seis compresores de la sala 1 representados en diagramas de sectores.

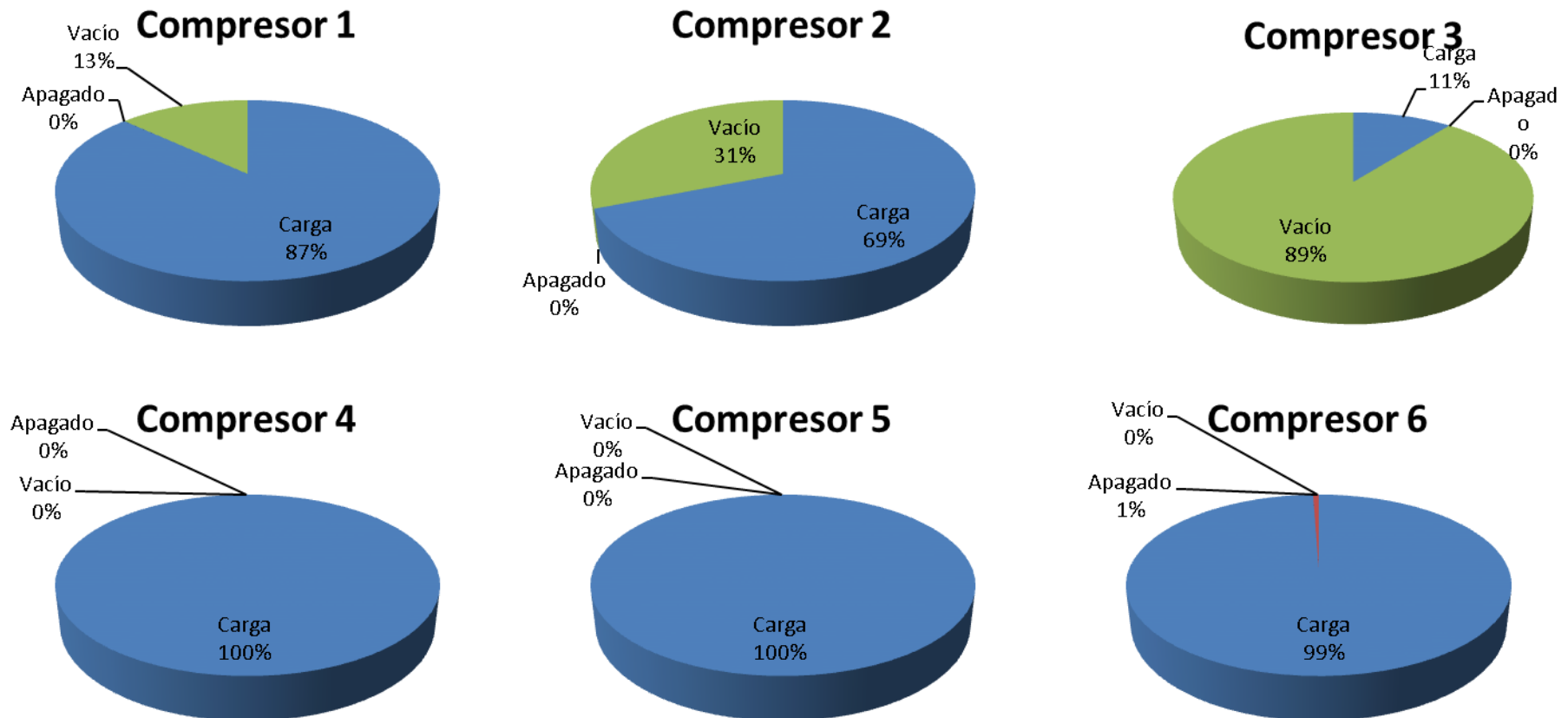


Ilustración 28. Potencia de los compresores de la sala 1

En cuanto a la Ilustración 25, que hace referencia al caudal y a la presión de la sala 1, se observa que tiene un consumo medio de caudal de 160 m³/min y se observan descensos en el caudal para los días 24/04/2013 que demanda un volumen de 150 m³/min y el día 25/04/2013 consume 120 m³/min.

En cuanto a la presión del sistema en los días de medición, podemos decir que la presión permanece prácticamente constante en un intervalo entre 6 bar y 7 bar. Si nos fijamos en los tramos donde la presión aumenta y después miramos el caudal, observamos que hacen curvas opuestas. Esto es debido a que los compresores van regulados por presiones, mucha presión en la línea significa un consumo bajo de caudal.

Las Ilustración 26 y la Ilustración 27 muestran el consumo de potencia de los compresores de la sala 1.

Se puede observar que el compresor 1 (representado de color azul en la Ilustración 26) está la mayor parte del tiempo funcionando en carga donde consume unos 220 kW, esto es generando el máximo caudal posible. A partir del día 25/03/2014 donde el caudal se ha reducido, se aprecia que el compresor funciona entre el punto de máxima carga y el punto de reposo o vacío. El compresor 2 (color rojo) se pasa prácticamente la mitad del tiempo en carga y la otra mitad del tiempo en vacío (en espera) consumiendo 75 kW. Si nos fijamos en el compresor 3 (de color verde) observamos que se pasa la mayor parte del tiempo en vacío y cuando la instalación necesita más caudal entra a trabajar proporcionándole el caudal necesario.

Si se observa la Ilustración 27, se observa claramente que los compresores 4, 5 y 6 se encuentran funcionando a plena carga en todo momento, consumiendo en torno a 220 kW. No se observa que bajen al punto de vacío, donde estos compresores consumen sobre los 75 kW.

En los diagramas de sectores mostrados en la Ilustración 28. Potencia de los compresores de la sala 1, se ve el porcentaje de funcionamiento de cada compresor.

En la Tabla 5, se hace un cuadro con los porcentajes de funcionamiento de cada uno. Se puede observar que los compresor 4, 5 y 6 están funcionando la totalidad del tiempo en carga, mientras que las máquinas 1 y 2 intercalan plena carga con tiempos en vacío. Además de lo anterior, el compresor 3 pasa la mayor parte del tiempo en vacío.

	Compresor 1	Compresor 2	Compresor 3	Compresor 4	Compresor 5	Compresor 6
% tiempo carga	86,9%	68,9%	10,6%	100,0%	100,0%	99,4%
% tiempo vacío	13,1%	31,1%	89,4%	0,0%	0,0%	0,6%
% tiempo parado	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabla 5. Porcentaje en carga, vacío y parado de los compresores de la sala 1

4.3.3 Gráficas potencia total y caudal

La Ilustración 29 refleja el caudal y la potencia total recogidos para la sala 1 durante los días de medición.

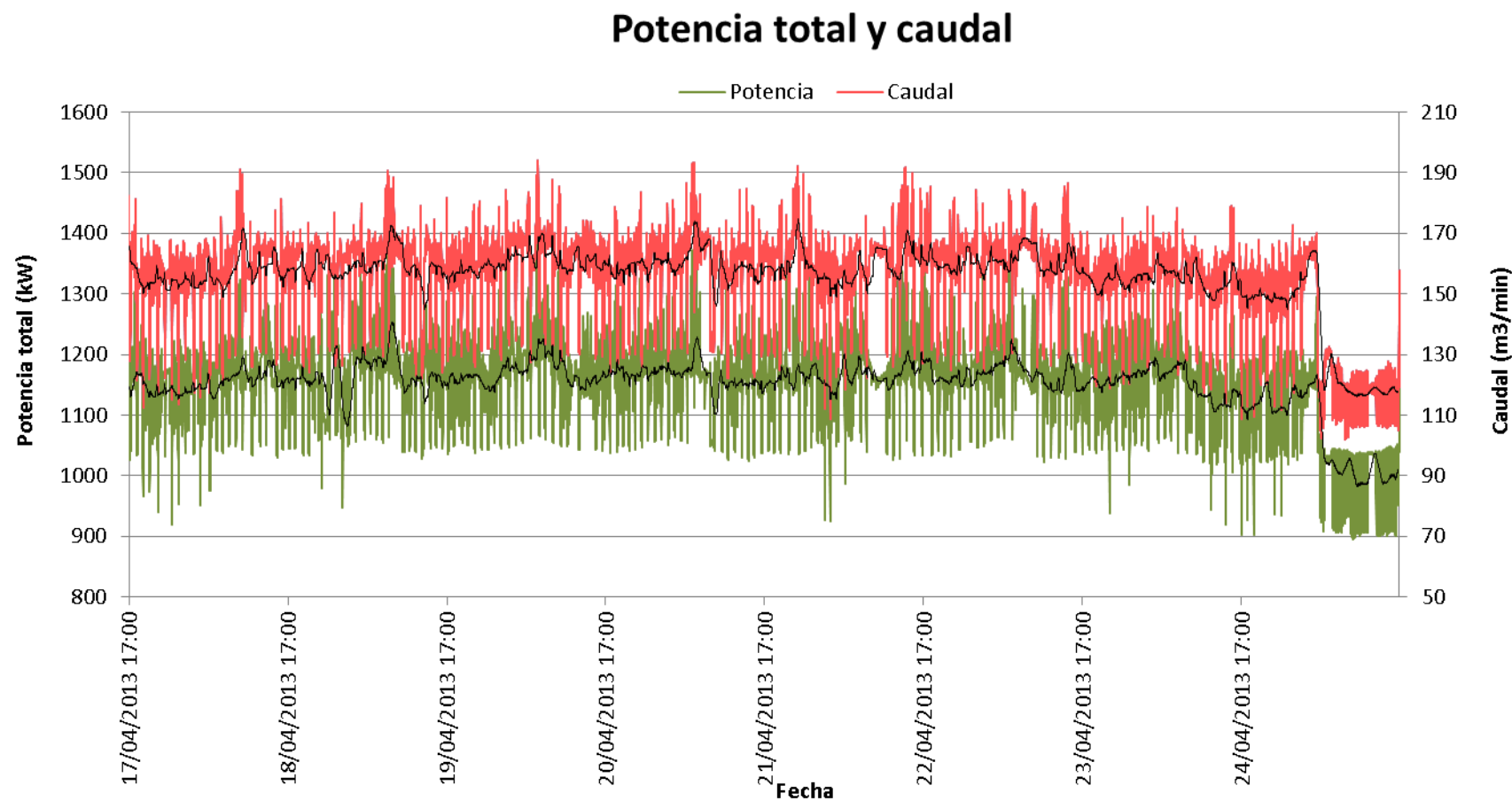


Ilustración 29. Potencia total y caudal para la sala 1

4.3.4 Potencia específica

En la Ilustración 30, se expresa la potencia específica recogida en cada momento para la sala 1, cabe recordar que la potencia específica es la relación entre potencia/caudal.

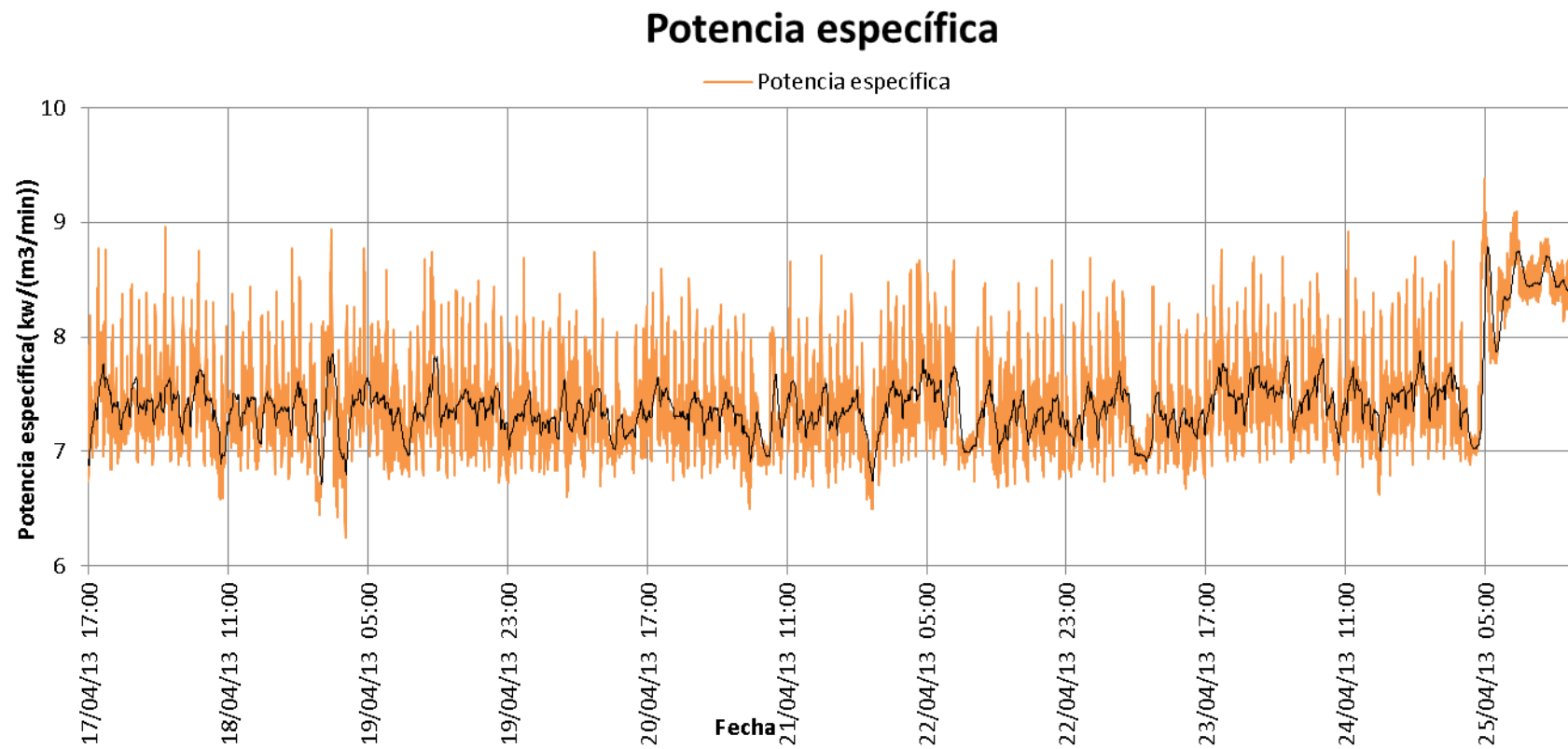


Ilustración 30. Potencia específica de la sala 1

4.3.5 Punto de rocío

El gráfico que se muestra a continuación, Ilustración 31, hace referencia al punto de rocío o lo que es lo mismo temperatura del aire de la instalación.

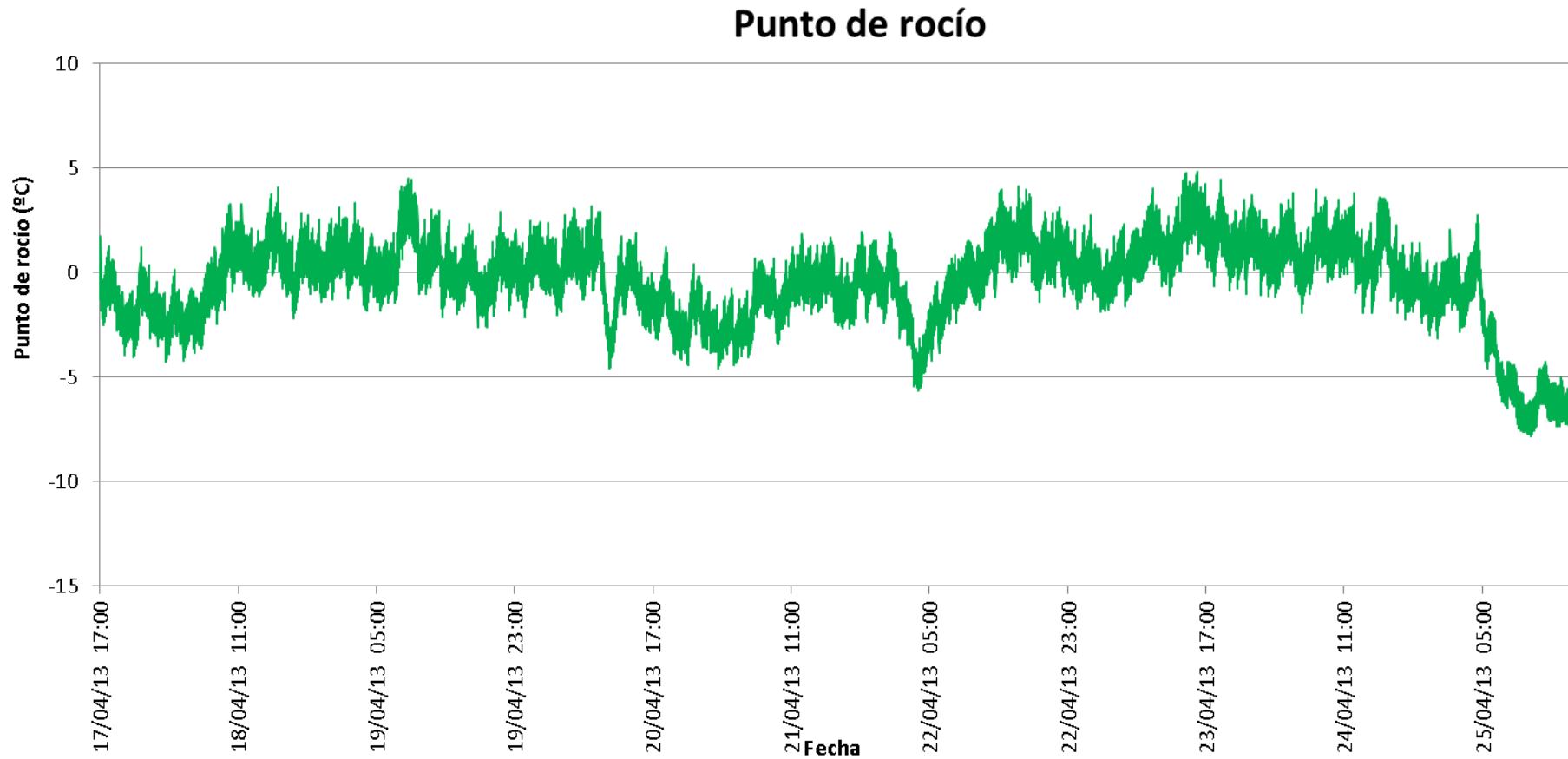


Ilustración 31. Punto de rocío medido en la sala 1

4.3.6 Curva de frecuencia de caudal

En la Ilustración 32, se muestra una curva de la frecuencia de caudal de la sala 1. Este gráfico hace referencia a los picos de caudal demandado para esta sala.

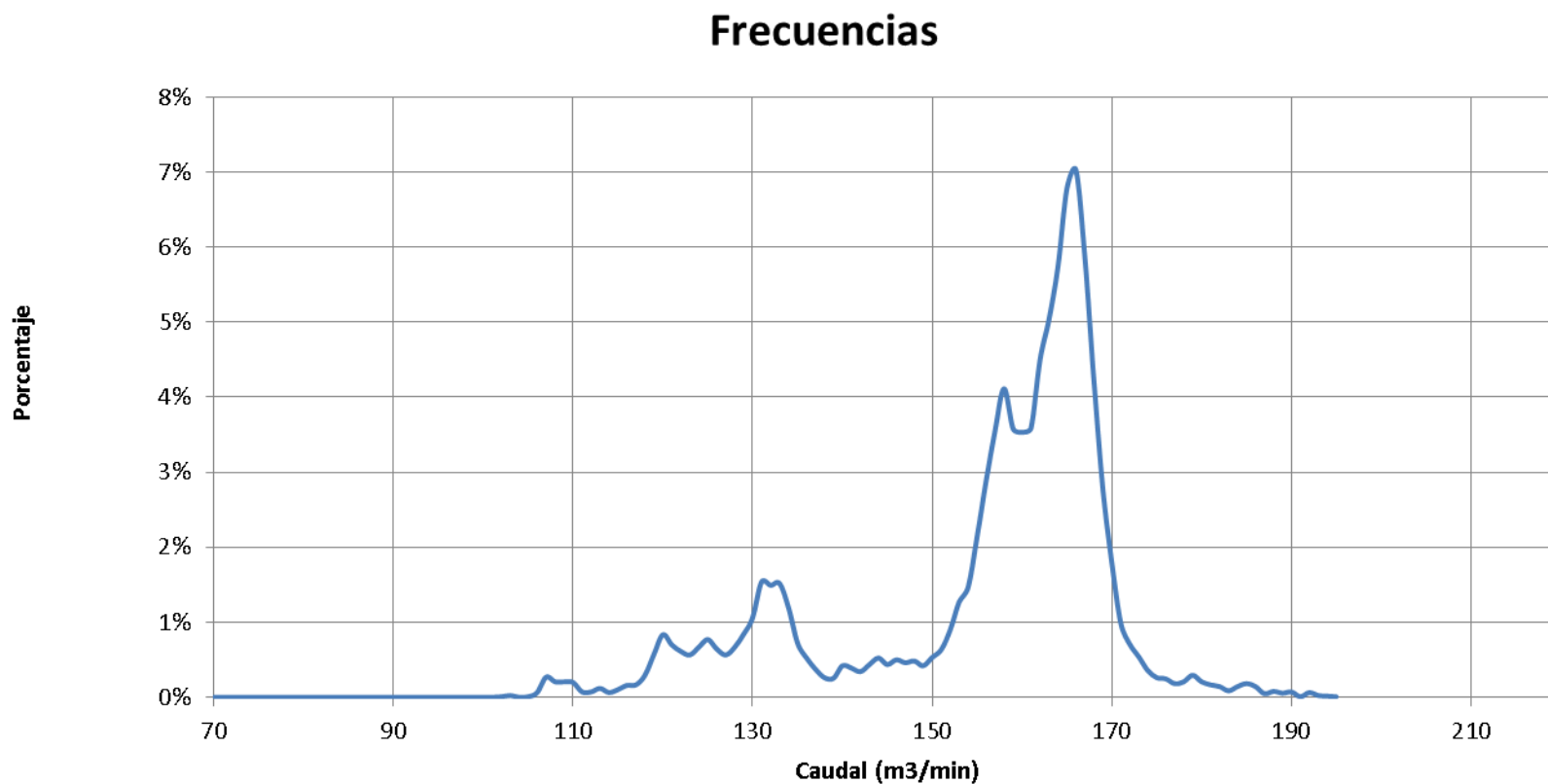


Ilustración 32.Frecuencia de caudal de la sala 1

Una vez sumados todos los caudales y potencias de los compresores vamos a observarlos globalmente (Ilustración 29). Vemos que en un primer tramo, hasta el día 24/04/2013 el consumo de potencia está en torno a los 1350 kW mientras que la media de caudal es de 156 m³/min. Después advertimos un descenso en el consumo de caudal lo que se transmite en una bajada de potencia hasta los 1150 kW y en caudal hasta los 120 m³/min.

La Ilustración 30 de potencia específica hace referencia al consumo de kW frente al aire comprimido generado. Observamos que hasta el día 24/04/2013 la potencia específica está sobre los 7,5 kW/ (m³/min), después en el segundo tramo observamos un incremento hasta los 8,5 kW/ (m³/min). Esta subida es debida a que en este segundo tramo algunos compresores (1, 2 y 3) entran muchas veces en vacío, lo que se transmite en un consumo de potencia pero no en aporte de caudal.

La Ilustración 31, nos muestra los datos medidos del punto de rocío, esta medida nos da una idea de la temperatura del aire que fluye por la instalación. Se puede observar que esta temperatura varía entre -7,5 °C y 5° C.

En cuanto al gráfico de frecuencia de caudal (Ilustración 32) observamos varios picos, esto hace referencia a los modelos de funcionamiento de la sala 1. Tiene dos picos fundamentales, el primero está en 130 m³/min con un porcentaje de tiempo empleado del 1,5 %; mientras el segundo está en 155 m³/min con una frecuencia del 4% del tiempo total y el tercer pico está en 165 m³/min.

	Potencia	Caudal	Potencia específica
Mínimo	895,44	101,86	6,25
Promedio	1154,89	156,80	7,40
Máximo	1435,04	194,20	9,38

Tabla 6. Resumen de los datos de la sala 1

La Tabla 6, hace un breve resumen numérico del mínimo, medio y máximo valor de la potencia el caudal y la potencia específica. Se observa que la potencia específica mínima es de 6,25 kW/(m³/min) y la máxima 9,38 kW/(m³/min) .

4.4 RESULTADOS DE LA SALA 2

En el siguiente apartado se muestran los datos técnicos de los compresores instalados en la actualmente en la sala 2 de la planta.

4.4.1 Hoja de datos de los compresores

En primer lugar se muestra los datos técnicos de los compresores que posee la sala 2, son compresores fijos Ga 75.

Compresores rindiendo según diseño	GA 75	GA 75 + 7 % eficiencia
CONDICIONES AMBIENTALES		
Presión ambiente	1,101	1,101
Presión en brida admisión	0,98	0,98
Temp en brida de admisión (°C)	20	20
Humedad relativa (%)	0	0
Temperatura agua de refrigeración (°C)	20	20
DATOS DE RENDIMIENTO		
Presión descarga bar (g)	7	7
Potencia eléctrica de mínima carga (kW)	/	/
Caudal mínima carga (m3/min)	/	/
Potencia eléctrica plena carga (kW)	89,5	95,765
Caudal admisión plena carga (m3/min)	13,11	13,11
Potencia al eje específica a plena carga (kW/(m3/min))	6,8	7,3

Tabla 7. Hoja de datos de los compresores actuales y los propuestos

[Referencia bibliográfica 14]

El número de compresores instalados en la sala 2 es de 4 elementos.

En la Tabla 7, se observan dos columnas para el mismo compresor, esto se debe a la pérdida de eficiencia de la máquina por su deterioro. Incrementamos un 7% a la potencia teórica de las hojas de ingeniería, en la realidad la pérdida de eficiencia lleva asociada un porcentaje mayor, pero daremos por bueno este valor y de esta manera no incurriremos en errores de cálculo.

Las condiciones ambientales se muestran puesto que cada compresor funciona diferente según el ambiente donde esté instalado, esto se aprecia en la presión de admisión y de descarga.

El compresor GA 75 instalado actualmente en la sala 2 es una máquina de funcionamiento fijo, esto significa que tiene tres puntos de funcionamiento: parado, vacío o carga. Genera un caudal máximo de 13,11 m³/min y consume 95,8 kW para conseguir generar ese aire. La presión de descarga del compresor es 7 bar y su potencia específica es de 7,3 kW/(m³/min).

El funcionamiento del compresor fijo Ga 75 y de un compresor aplicado un 7% de pérdida de eficiencia es el mostrado en Ilustración 33. Observamos que la línea roja resultará menos eficiente de cara al consumo de potencia que la azul. Para los cálculos se emplea la roja debido a que los compresores han perdido su funcionamiento óptimo puesto que son equipos viejos.

Compresor fijo GA 75

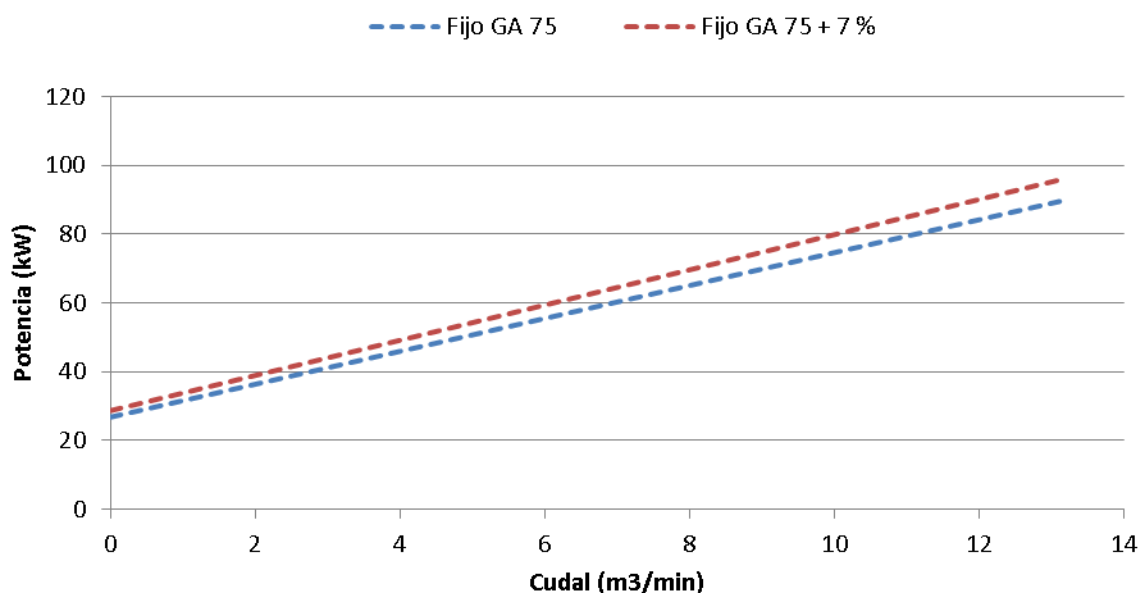


Ilustración 33. Compresor GA 75

4.4.2 Gráfica de caudal

En la Ilustración 34, se muestra el caudal recogido en la sala 2 durante los días de medición.

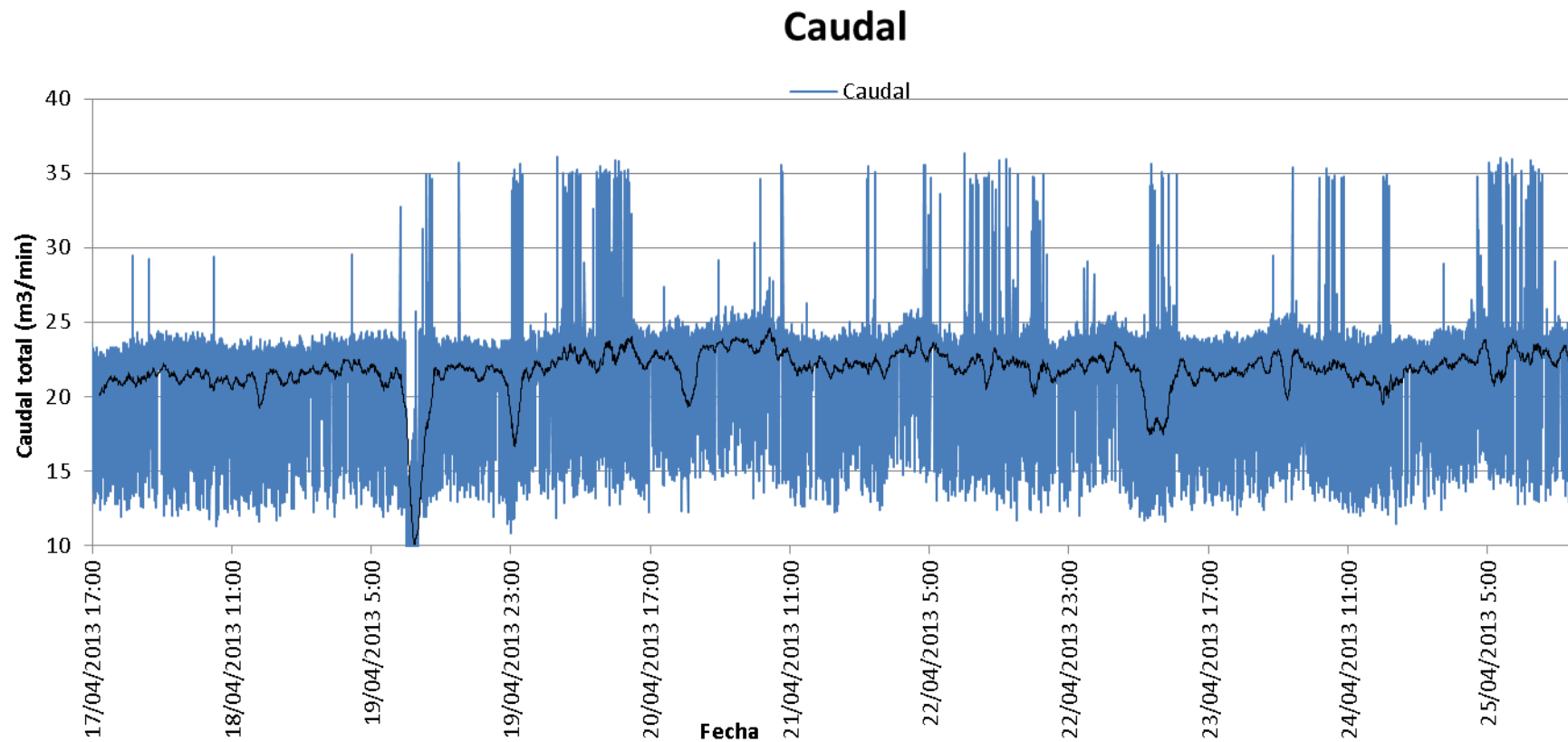


Ilustración 34. Caudal de la sala 2

4.4.3 Gráficas de potencia

La Ilustración 35, hace referencia a la potencia consumida por los compresores de la sala 2.

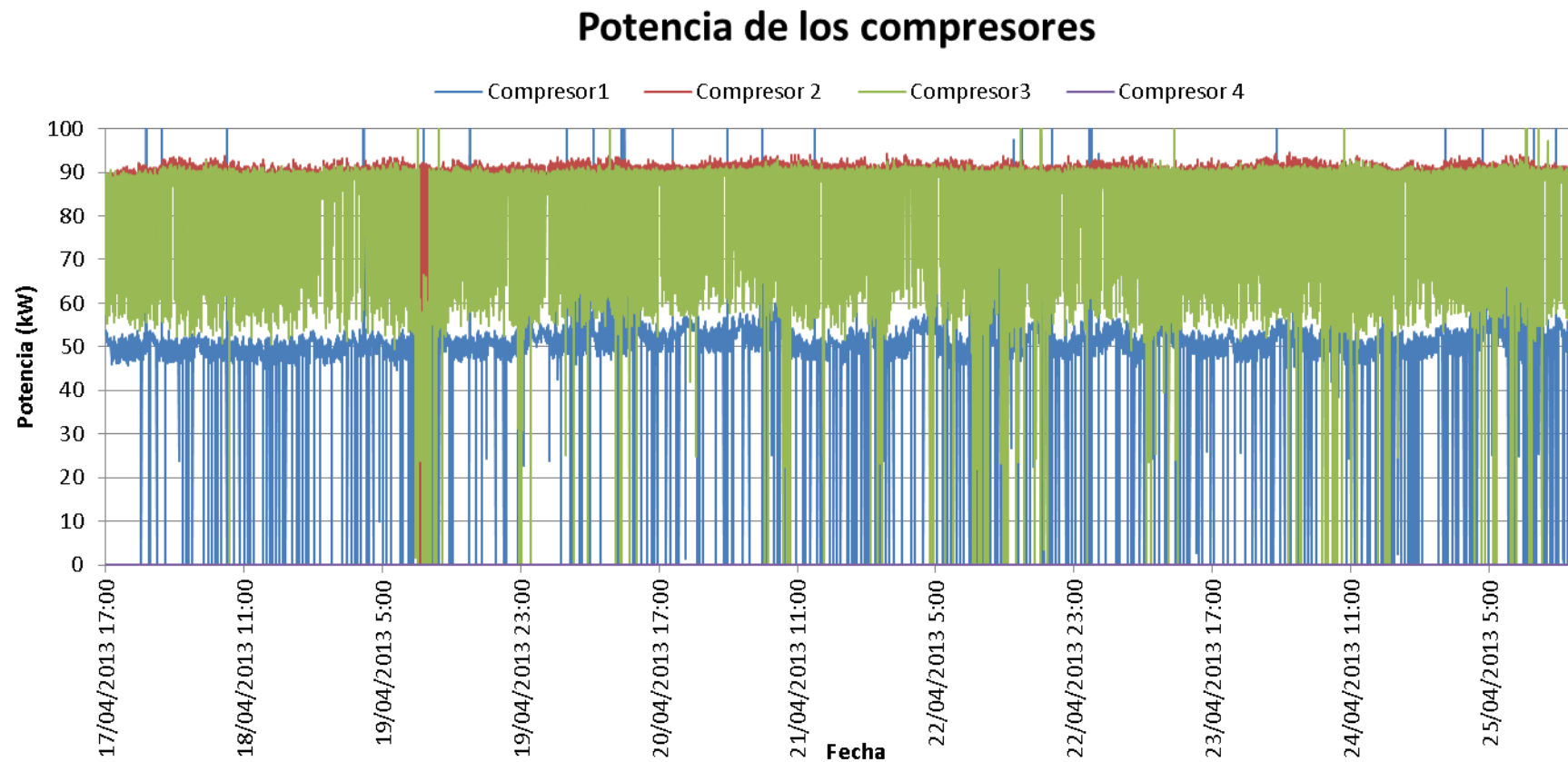


Ilustración 35. Potencia de los compresores de la sala 2

4.4.4 Porcentaje de funcionamiento

A continuación se muestra de una manera clara el funcionamiento de los compresores de la sala 2 a través de los diagramas de sectores.

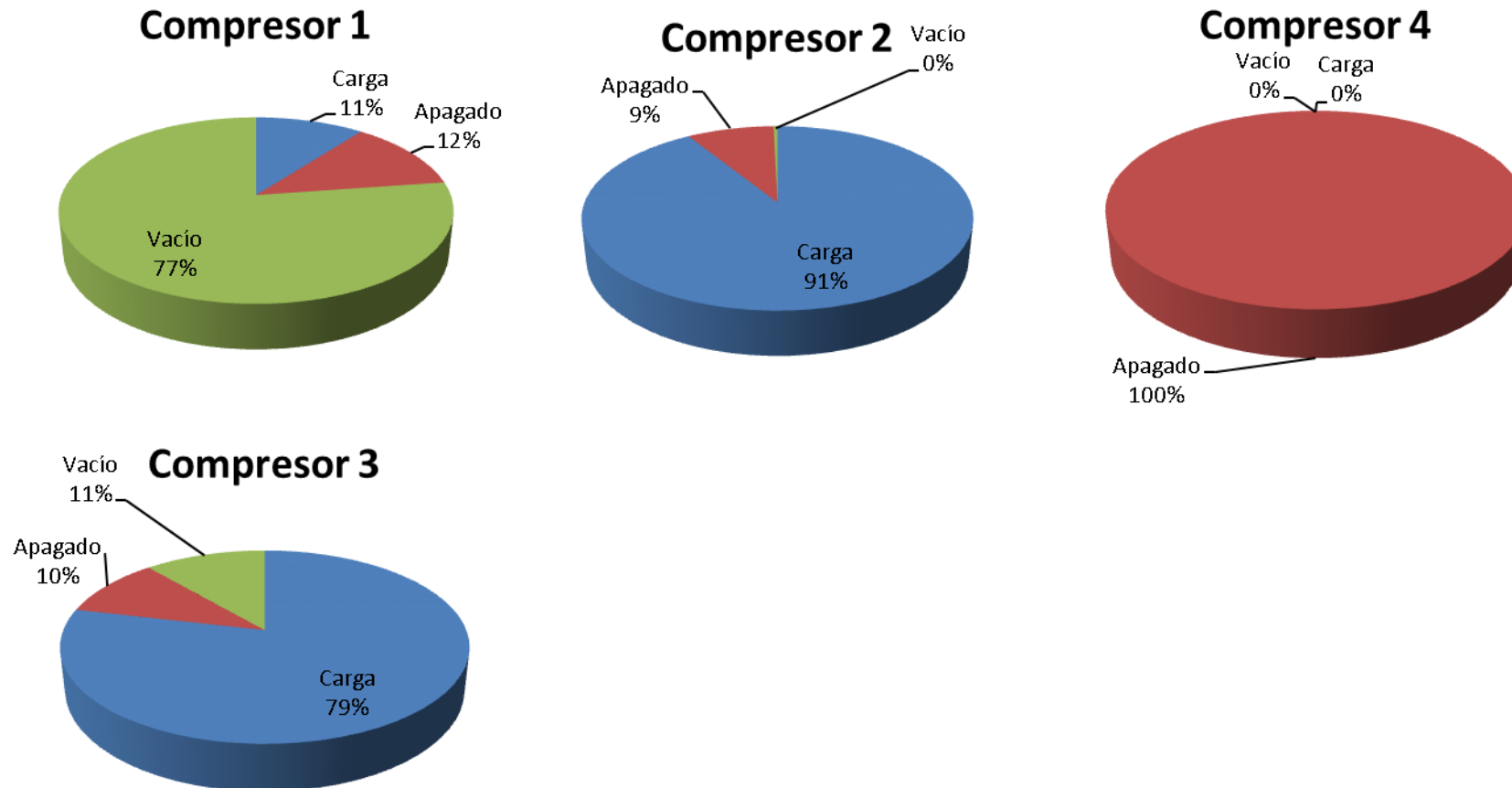


Ilustración 36. Potencia de los compresores de la sala 2

El Ilustración 34, muestra los datos de caudal recogidos durante los días 17 al 25 de abril del 2013, se observa que la sala 2 genera un caudal medio entre 20 m³/min y 24 m³/min.

Existen máximos y mínimos en el caudal, pero no son la manera habitual de trabajo para esta sala. Con esa demanda de caudal es de esperar que estén en funcionamiento en esta sala entre 2 y 3 compresores. Así que un compresor de los actuales no entra en ningún momento en funcionamiento. Lo que revela que la instalación de la sala 2 está sobredimensionada, sobrando un compresor en dicha instalación.

En el Ilustración 35, se muestra el funcionamiento de los compresores. El compresor 2 está en todo momento funcionando en carga consumiendo 90 kW. El funcionamiento del compresor 3 alterna puntos de plena carga y puntos de vacío. Mientras que el compresor 1 pasa la mayor parte del tiempo en el punto de vacío, donde consume unos 50 kW. Observamos que el compresor 4 no entra en funcionamiento en ningún momento.

Observando las potencias de cada compresor se comprueba lo expuesto con anterioridad, que la instalación funciona con dos compresores y medio la mayor parte del tiempo, por lo que la sala está sobredimensionada.

En los diagramas de sectores mostrados arriba (Ilustración 36) se ve el funcionamiento de cada compresor. Observamos que los compresor 2 y 3 están funcionando la totalidad del tiempo en carga, la máquina 1 funciona la mayor parte del tiempo en vacío y el compresor 4 está continuamente apagado.

La **Error! Reference source not found.**, que se muestra a continuación hace un resumen del tanto por ciento que pasa cada compresor en cada punto característico de funcionamiento.

	Compresor 1	Compresor 2	Compresor 3	Compresor 4
% tiempo carga	10,4%	91,1%	78,6%	0%
% tiempo vacío	12,3%	0,4%	11,4%	0%
% tiempo parado	77,3%	8,5%	10,0%	100%

Tabla 8. Porcentaje en carga, vacío y parado de los compresores de la sala 2

4.4.5 Potencia y caudal total

El siguiente gráfico muestra la potencia total y caudal total producido por la sala 2.

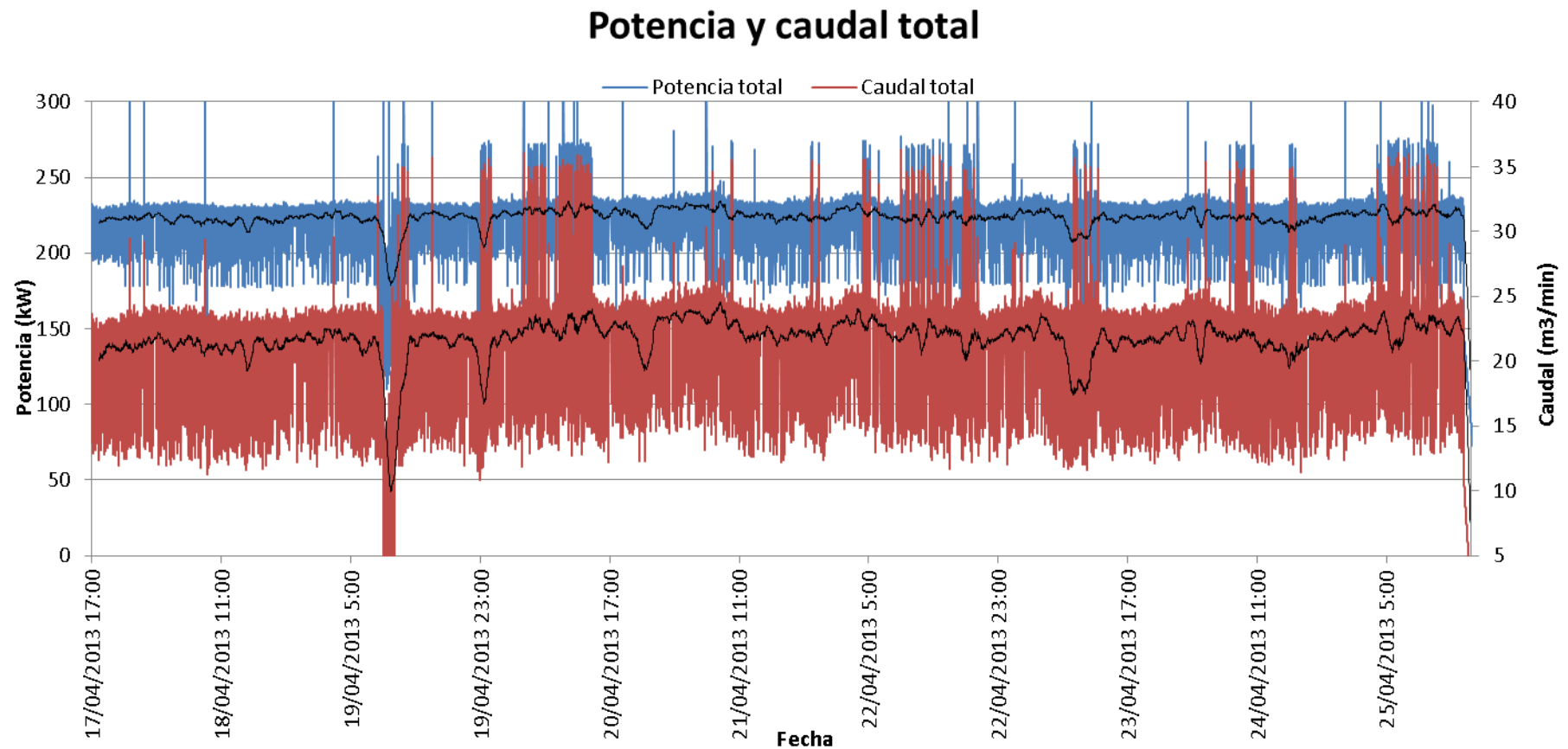


Ilustración 37. Potencia total y caudal de la sala 2

4.4.6 Gráfica de potencia específica

A continuación se muestra la representación de la potencia específica que se recogió en la sala 2 durante la medición.

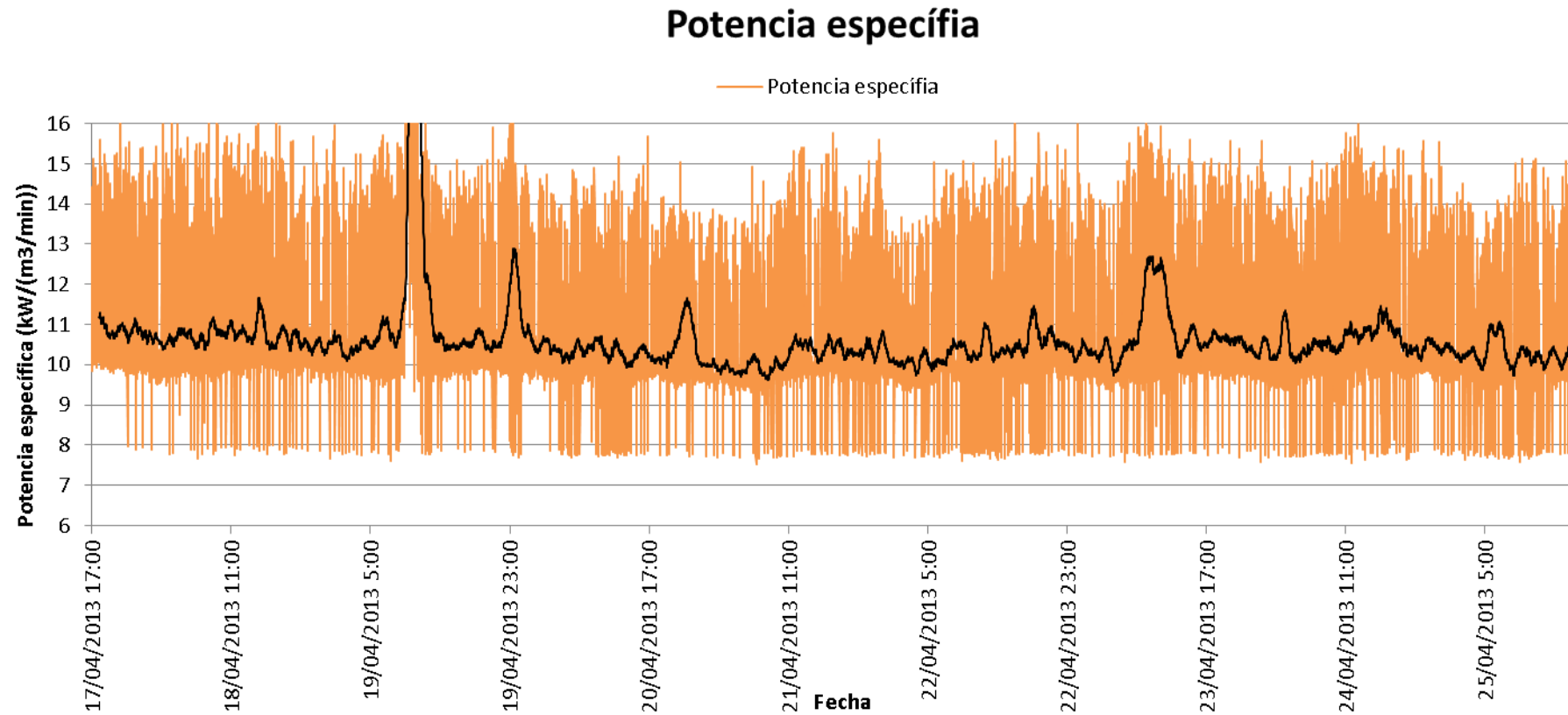


Ilustración 38. Potencia específica de la sala 2

4.4.7 Curva de frecuencia de caudal sala 2

La siguiente curva refleja el caudal demandado por la sala 2 a través de una gráfica de frecuencia de caudal.

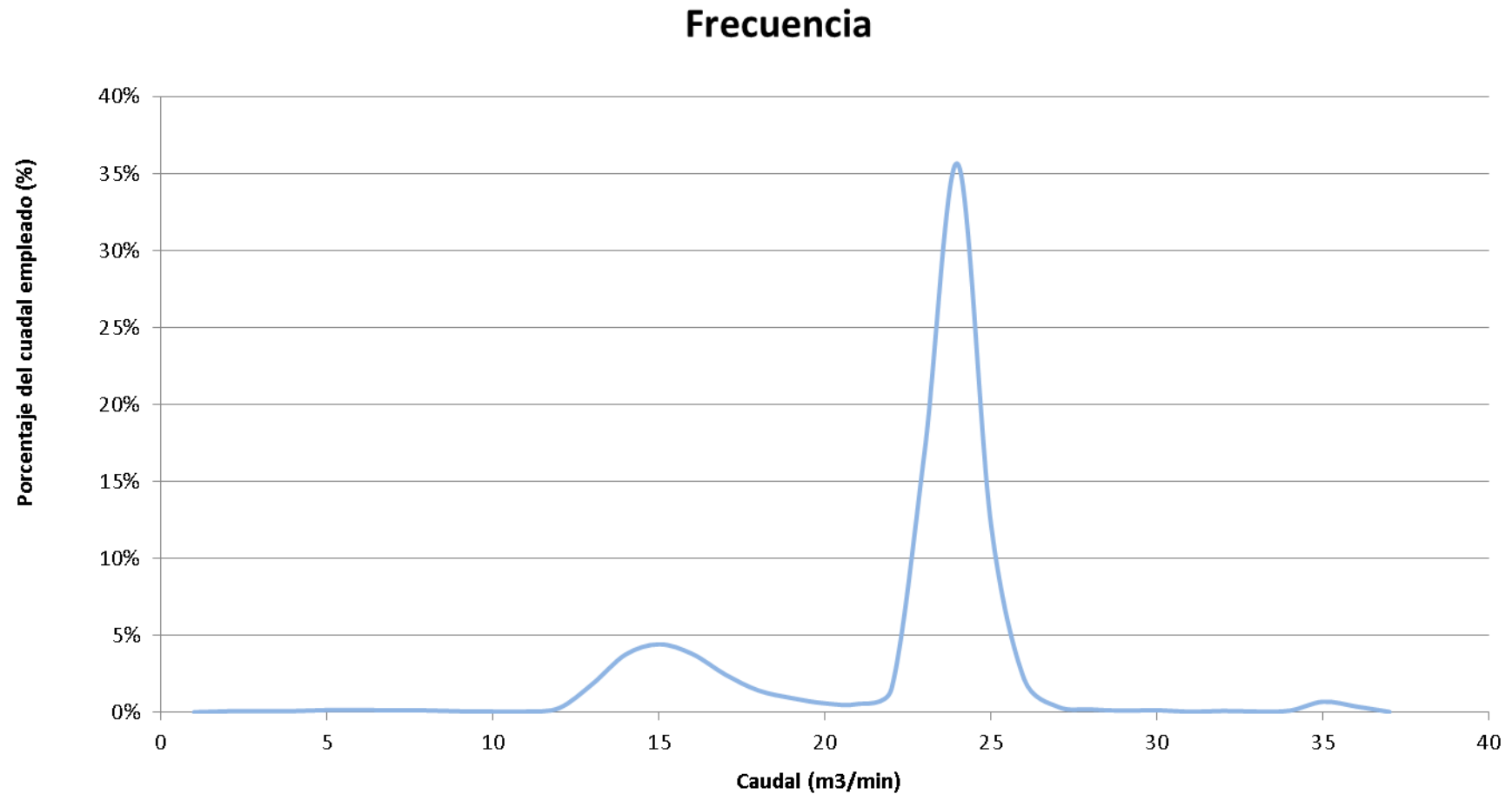


Ilustración 39. Curva de frecuencia de caudal para la sala 2

En la Ilustración 37, se muestra el consumo total de potencia y caudal demandado por la sala 2. Se observa que la media de caudal demandado es cercano a los 25 m³/min con un consumo medio de potencia de unos 225 kW. Con estos valores de caudal y potencia se puede afirmar que con dos compresores de los actuales bien coordinados, trabajando a plena carga y otro compresor de apoyo para los picos puntuales, sería suficiente para generar el aire que la planta demanda.

En la Ilustración 38, se muestra la potencia específica de la sala 2, esta relación es la división entre potencia y caudal para cada instante medido. Se observa que la media de potencia específica está entre 10 kW/m³/min y 11 kW/m³/min, salvo algún punto que se dispara superando los 14 kW/m³/min. Esto es debido a que hay puntos donde los compresores no están entregando aire pero si están consumiendo potencia, lo que genera picos considerables en la potencia específica. Unos valores elevados de potencia específica denotan que no es eficiente el sistema actual.

La Ilustración 39, semuestra una curva de frecuencia del caudal para la sala 2. De esta manera se expresa el tanto por ciento del funcionamiento para cada caudal y de esta forma hacer un esquema de la demanda de esta sala. Cada pico que se observa es característico de la manera de trabajar de un conjunto de compresores o de la instalación.

La representación de frecuencia caudal muestra que la sala 2 tiene dos modos de funcionamiento. El primer pico muestra que el 5 % del tiempo está consumiendo 15 m³/min de aire, esto se debe a que por las noches la producción baja y por lo tanto el caudal necesario. Mientras que el segundo pico muestra el funcionamiento principal, esto es el turno de día donde el 35% del tiempo está demandando unos 24 m³/min.

	Potencia	Caudal	Potencia específica
Mínimo	74,36	0,07	7,53
Promedio	223,03	21,66	10,89
Máximo	367,46	36,36	16,20

Tabla 9. Resumen de los datos recogidos en la sala 2

La Tabla 9, muestra los mínimos, máximos y medios de las medidas más relevantes. Si se analiza la potencia específica la mínima es de 7,53 kW/(m³/min) y la máxima de 16,20 kW/(m³/min), con estos valores se puede observar que la relación aire entregado frente a potencia consumida no es nada buena, esto es debido a que hay al menos dos compresores (1 y 3) que están por encima del 10% del tiempo en vacío, es decir consumiendo potencia pero no entregando aire.

4.5 RESULTADO DE LA SUMA DE AMBAS SALAS

En este punto se hace un compendio de ambas salas. Se suman los caudales y potencias de ambas salas obtenemos unas gráficas que muestran el funcionamiento general de la instalación.

4.5.1 Gráficas de la suma de caudal de ambas salas

Después de sumar el caudal de la sala 1 y la sala 2 se obtiene el gráfico de la Ilustración 40.

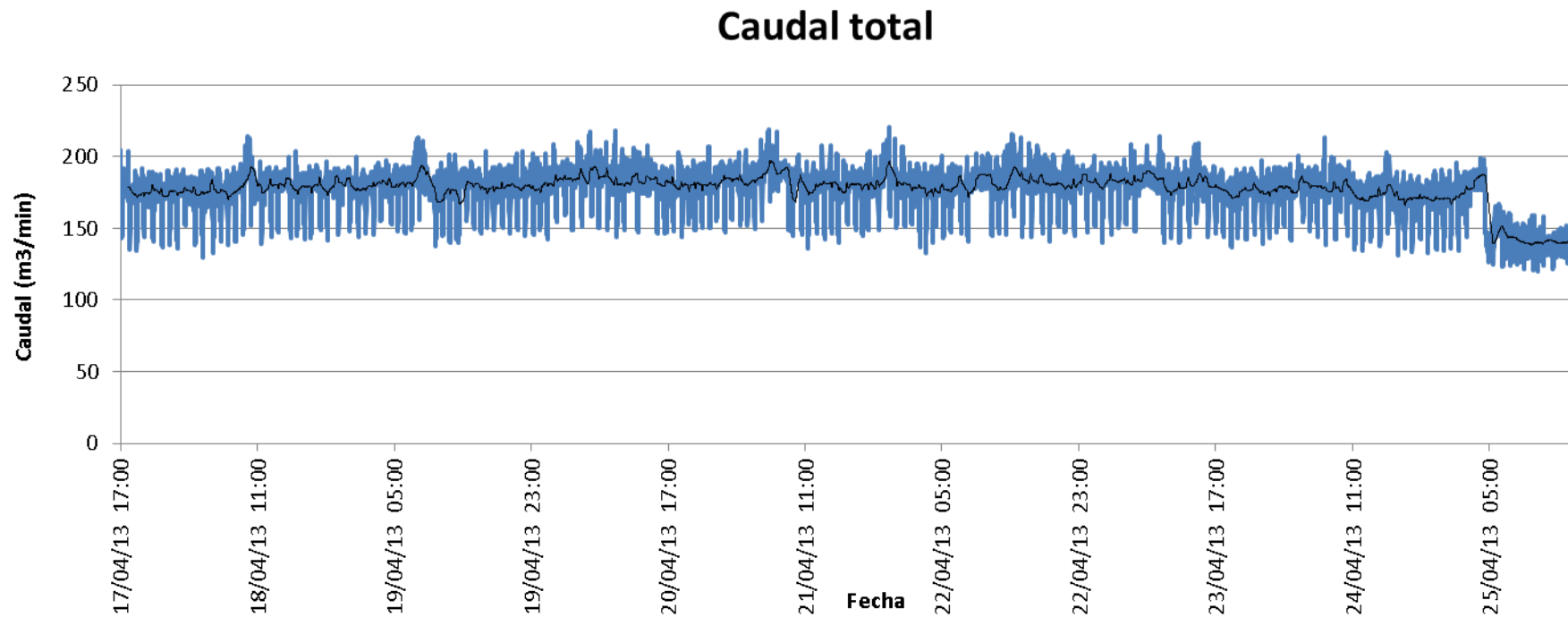


Ilustración 40. Caudal total de ambas salas

4.5.2 Graficas de la suma de potencia de ambas salas

La gráfica siguiente, Ilustración 41, refleja el consumo de potencia de la instalación en términos de generación de aire comprimido.

Potencia total

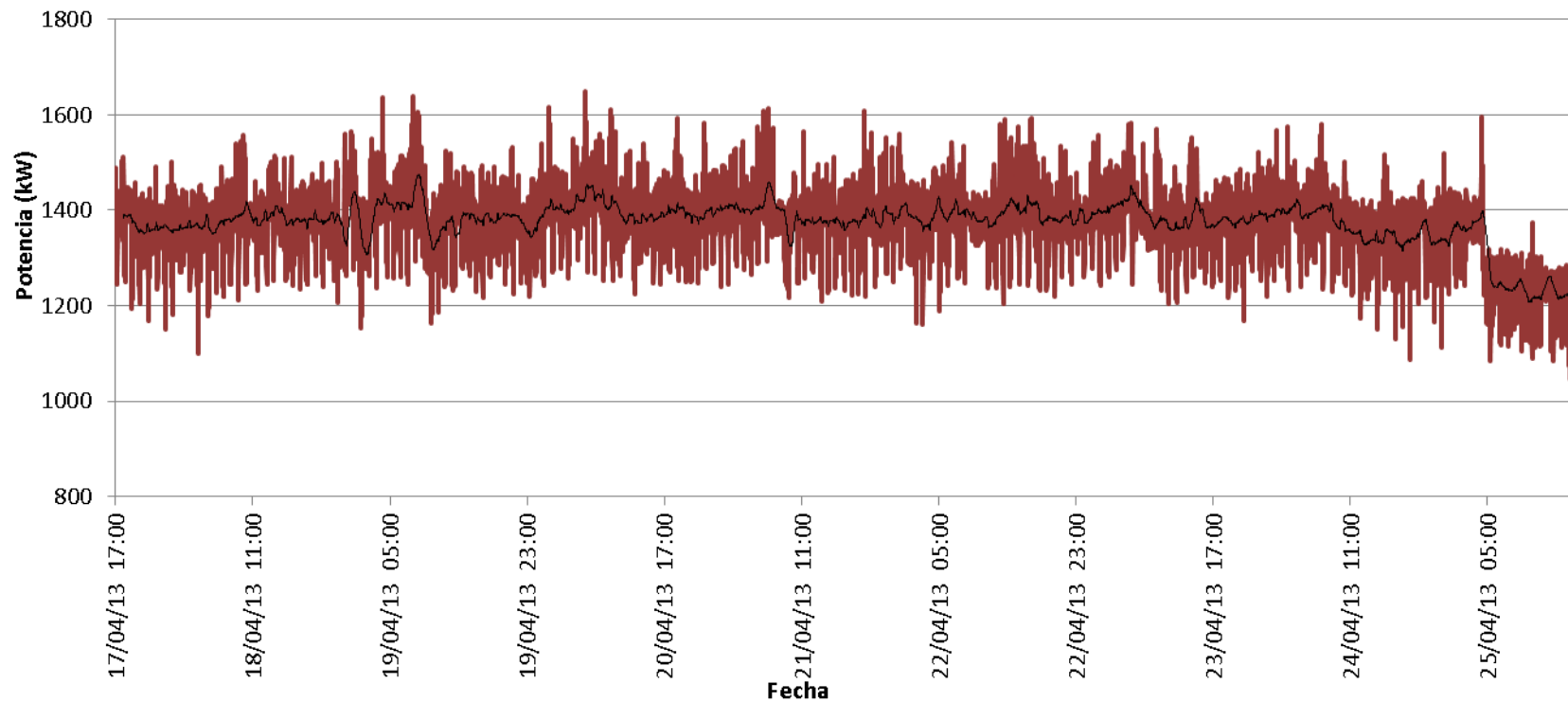


Ilustración 41. Potencia total de ambas salas

El caudal total de ambas salas se representa en la Ilustración 40, varía entre 100 m³/min y 225 m³/min y su media en torno a 175 m³/min. Se observa que durante los primeros días de toma de datos entre el día 17/04 y el 24/04 los consumos de aire son los más elevados, sobre los 175 m³/min. Los días sucesivos el caudal disminuye hasta los 140 m³/min.

En cuanto a la potencia total en la Ilustración 41, se muestra los consumos totales de ambas salas, desde el día 17/04 hasta el 24/04 se observan consumos entre 1000 kW y 1650 kW, con un media cerca de los 1400 kW. A partir de día 24 el consumo de potencia disminuye hasta los 1250 kW de media, esto es debido al cambio de turno del fin de semana, donde la producción baja.

	Potencia	Caudal	Potencia específica
Mínimo	1019,55	108,59	6,60
Promedio	1373,74	177,20	7,79
Máximo	1648,29	220,54	9,82

Tabla 10 .Resumen de los datos recogidos para la suma de ambas salas

La Tabla 9, se hace un resumen de la suma de las principales magnitudes de la instalación. La planta consume un caudal máximo de 220,5 m³/min y un mínimo de 108,6 m³/min. En cuanto a la potencia consumida máxima es de 1019,5 kW y un mínimo de 1648,3 kW.

4.5.3 Gráficas potencia específica para la suma de ambas salas

En la Ilustración 41 se muestra la potencia específica total de la planta.

Potencia específica

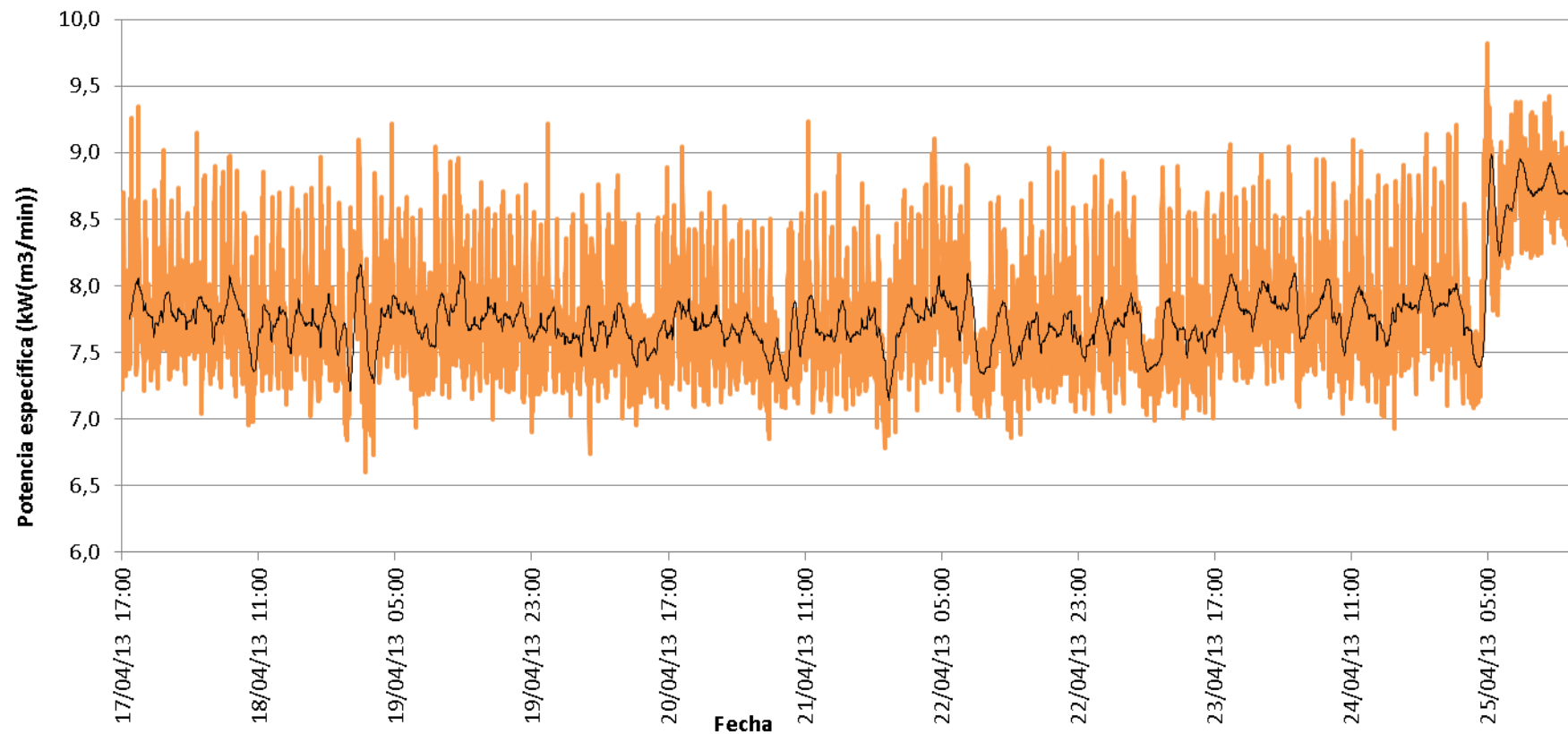


Ilustración 42. Caudal total de ambas salas. Potencia específica

4.5.4 Curva de la suma de los caudales de ambas salas

En la Ilustración 43, que se muestra a continuación es la suma de las frecuencias de cada sala para mostrar un gráfico de frecuencias total.

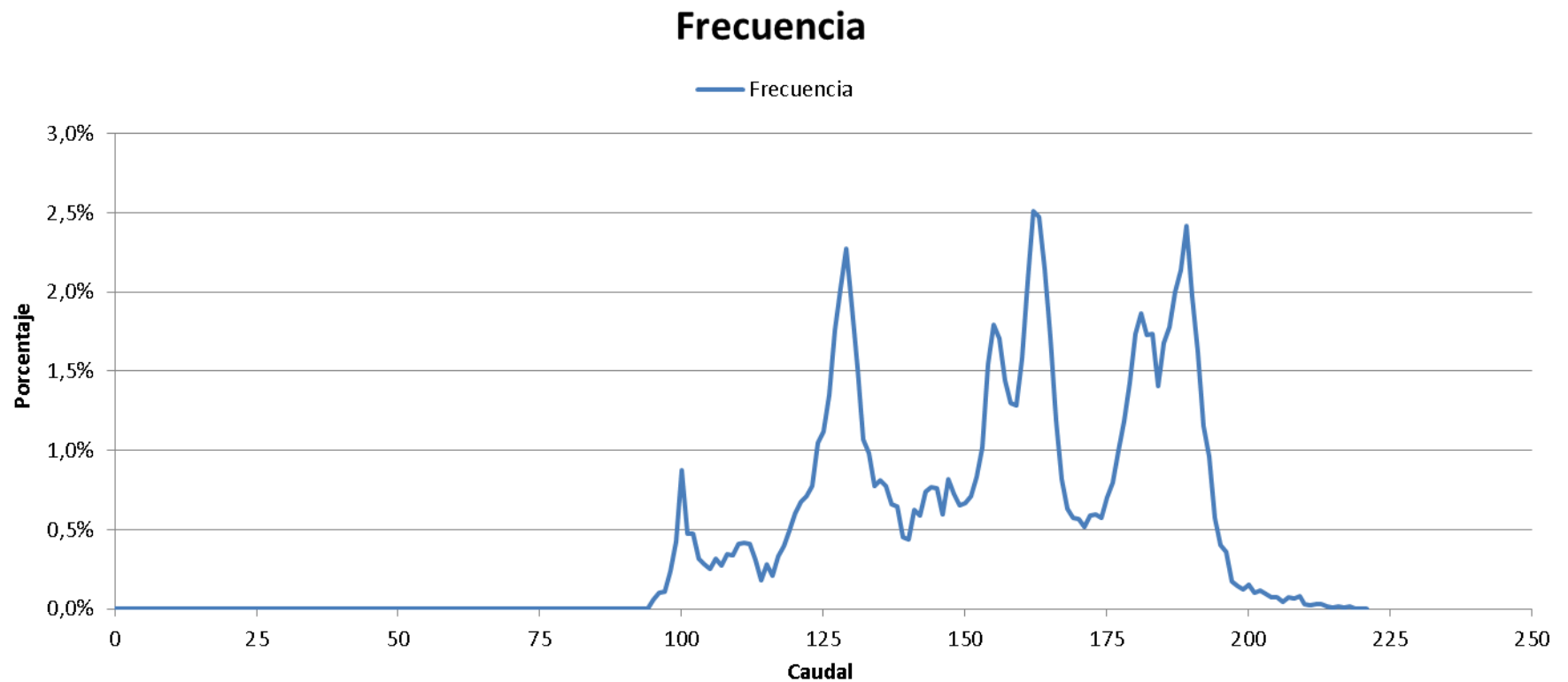


Ilustración 43. Frecuencia del caudal para la sala 2.

La Ilustración 42, muestra la potencia específica resultante para ambas salas. Se puede observar que permanece bastante constante durante todo el periodo de medición con un valor medio de $7,79 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min})$. Su máximo es de $9,82 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min})$, mientras que el mínimo corresponde a $6,60 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min})$. A partir del día 25 se observa un incremento en la potencia específica hasta los $9,82 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ esto es debido a un cambio en el turno de funcionamiento, al entrar el fin de semana.

En la Ilustración 43, se reflejan los valores de caudal más empleados en función de la frecuencia, al sumar el caudal de ambas salas, esto quiere decir que se puede predecir el modo de funcionamiento de la planta si se observan los principales picos de caudal. Se ven tres picos fundamentales en $125 \text{ m}^3/\text{min}$ con un porcentaje del 2,3 %, en $160 \text{ m}^3/\text{min}$ con un porcentaje del 2,5 % y en $190 \text{ m}^3/\text{min}$ sobre los 2,4%.

4.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se analizan los datos recogidos con anterioridad con el objetivo de modificar la planta para conseguir que sea lo más eficiente posible.

4.6.1 Resultados sala 1

La sala 1 cuenta con 6 compresores Fijos 200 de los cuales los compresor 4, 5 y 6 trabajan a plena carga durante todo el tiempo. El compresor 1 trabaja a plena carga durante el 87% del tiempo. La máquina 2 funciona en carga el 69% mientras que el compresor 3 trabaja el 89% en vacío. Lo que significa que esta sala no está bien dimensionada y el número de compresores no es el correcto. Podríamos suprimir el compresor 3 ó dejarle como backup.

De este modo si durante la producción se estropea alguno de los otros compresores(4,5 y 6), entonces puede ser sustituido por este compresor de backup y de esta manera no variar la producción de la planta.

	Compresor 1	Compresor 2	Compresor 3	Compresor 4	Compresor 5	Compresor 6
% tiempo carga	86,9%	68,9%	10,6%	100,0%	100,0%	99,4%
% tiempo vacío	13,1%	31,1%	89,4%	0,0%	0,0%	0,6%
% tiempo parado	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabla 11. Porcentaje de funcionamiento de cada compresor

La Tabla 11, muestra un resumen del funcionamiento de los compresores de la sala 1.

En la Ilustración 44, se observa el funcionamiento de la sala 1, se muestra un compresor a continuación del otro, puesto que esa es su manera de coordinar su funcionamiento. Comienza a funcionar un compresor pero la planta demanda más caudal, entonces se enciende otro y así hasta cubrir la demanda. Como se comentó con anterioridad en este gráfico, se observa claramente que la curva de frecuencias se queda en el quinto compresor y solo entra a funcionar el sexto en contadas ocasiones, con lo que se podría desconectar del sistema y dejar para backup en caso de que alguno de los otros compresores fallase.

Funcionamiento sala 1

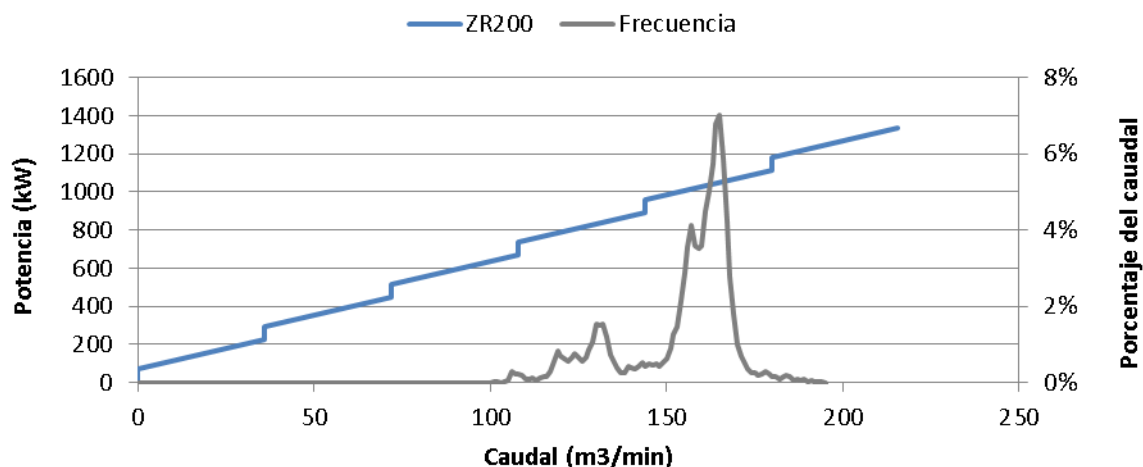


Ilustración 44. Frecuencia de Caudal y funcionamiento de los compresores de la sala 1

4.6.2 Resultados sala 2

Si se observa el funcionamiento de los compresores de esta segunda sala obtenemos que el compresor 1 trabaja el 85% en vacío. El compresor 2 el 100 % en carga. La máquina 3 el 86 % en carga y el compresor 4 el 100% apagado. Esta manera de funcionar nos revela de nuevo que esta sala está sobredimensionada. Con dos compresores funcionando a plena carga, se puede cubrir la demanda solicitada. En esta ocasión hay dos compresores instalados y preparados para trabajar que son totalmente prescindibles.

La Tabla 12, resume los porcentajes de funcionamiento de los compresores de la sala 2.

	Compresor 1	Compresor 2	Compresor 3	Compresor 4
% tiempo carga	11,4%	99,6%	85,9%	0%
% tiempo vacío	4,1%	0,4%	12,4%	0%
% tiempo parado	84,5%	0,0%	1,7%	100%

Tabla 12. Porcentaje de funcionamiento de cada compresor

En la Ilustración 45, se muestra el modo de funcionamiento en cascada de los compresores de la sala 2, superponiendo el funcionamiento escalonado de los compresores con la curva de frecuencia de caudal.

Funcionamiento sala 2

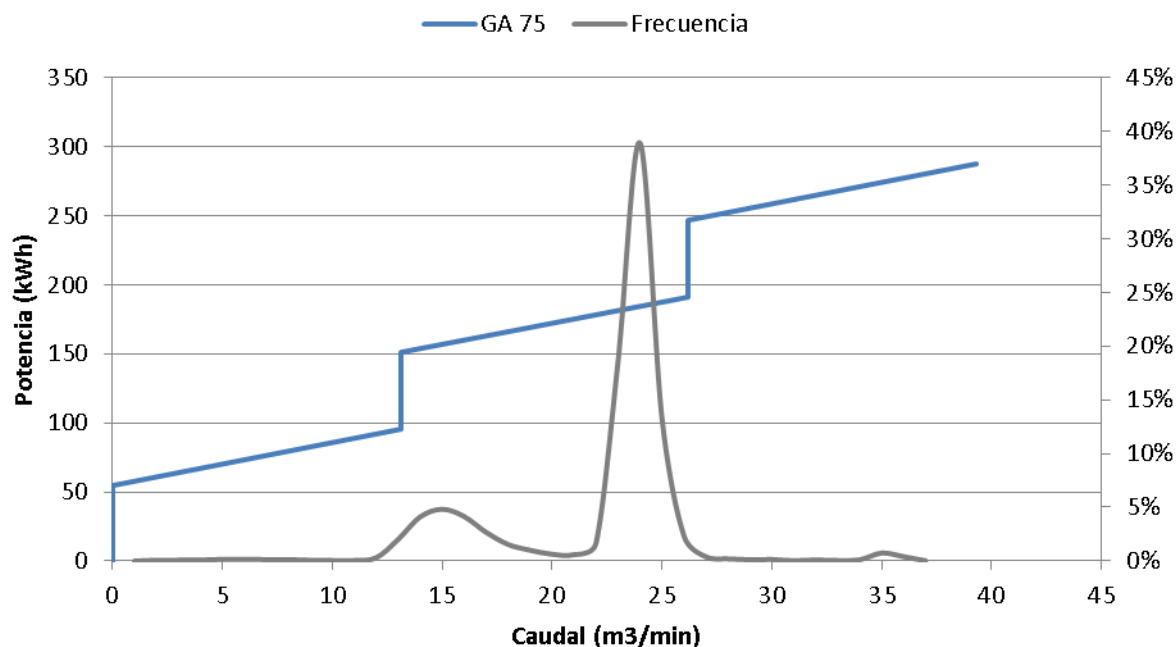


Ilustración 45.Frecuencia de caudal y funcionamiento de los compresores de la sala 2

Se observa que el grueso del funcionamiento lo hace sobre los 25 m3/min y este caudal se puede generar con dos compresores a plena carga, encendiéndose puntualmente el tercer compresor. Con esto y con los porcentajes de funcionamiento de cada compresor, es posible capaces apuntar que esta sala está sobredimensionada y que sobran dos compresores. Estas dos máquinas se pueden emplear como backup de esta segunda sala, por si falla alguno de los que están operativos y así no parar en ningún momento la producción.

5. PROPUESTA DE MEJORA

A continuación se muestra los cálculos obtenidos de potencia para cada sala, con la configuración actual y después se muestra los cálculos para la propuesta de mejora. Para ello se integra la curva de caudal con la potencia que consume para cada modelo de funcionamiento y así se obtiene el consumo anual de cada sala.

5.1 PROPUESTAS PARA LA SALA 1

A continuación se resumen los resultados de la sala 1, se obtiene un valor de consumo de potencia, se proponen alternativas y se comparan los resultados.

5.1.1 Funcionamiento actual

En este apartado se muestra el modelo de funcionamiento actual de la sala 1, consta de seis compresores funcionando en cascada, es decir, cuando un compresor se enciende y no llega a producir el caudal suficiente, se enciende el compresor inmediatamente superior. Se observa que el grueso del funcionamiento lo hace con 5 compresores.

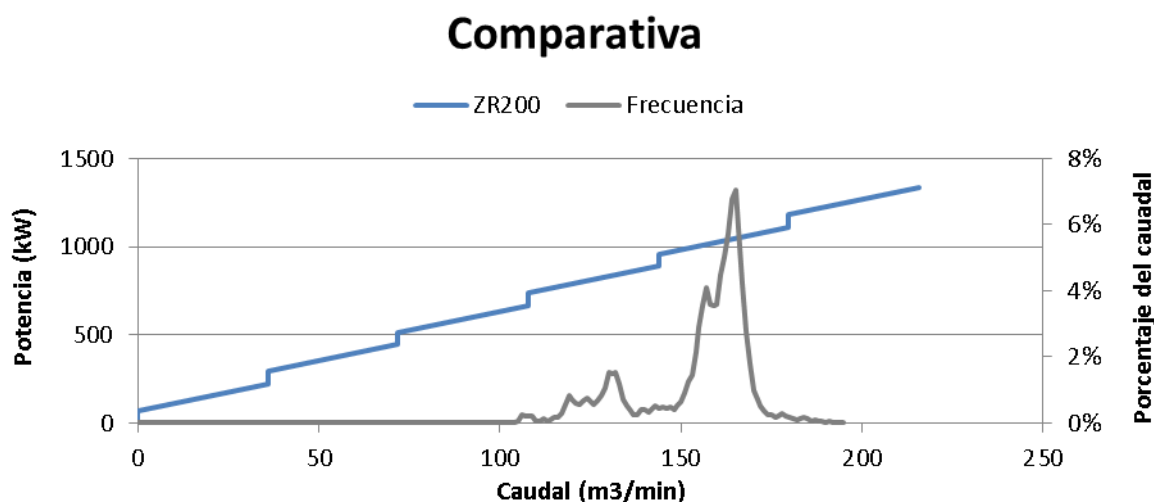


Ilustración 46. Funcionamiento actual sala 1. Comparativa

En la Ilustración 46, se muestran los compresores de la sala 1 y la curva de frecuencia del caudal.

5.1.2 Consumo anual actual

	ZR200
Potencia media (kW)	1.062,63
Potencia año (kWh)	9.032.323,43
Coste de la energía (€)	903.232,34

Tabla 13. Consumo anual en la sala 1

En la primera celda de la Tabla 13. Consumo anual en la sala 1, se muestra la potencia media, la segunda celda se obtiene multiplicado el primer valor por 8500 horas que se estima como horas en funcionamiento y por último se multiplica por el precio del kWh que es 0,1 €, para obtener el coste de la energía de la sala 1 que asciende a **903.232,34 €**.

5.1.3 Propuestas

En las propuestas para la sala 1 se ha elegido la tecnología centrífuga en los compresores, puesto que estas máquinas se emplean para generar caudales grandes. La primera propuesta de mejora trata de un compresor centrífugo C1000 que se va a encargar de generar y regular todo el caudal necesario para la sala 1.

La segunda propuesta consta de dos compresores centrífugos C700 compartiendo carga y de esta manera generan el caudal demandado, los datos técnicos de los compresores propuestos son:

Compresores rindiendo según diseño	C1000 C200MX3	C700 C100MX3
CONDICIONES AMBIENTALES		
Presión ambiente	1,101	1,101
Presión en brida admisión	0,98	0,98
Temp en brida de admisión (°C)	20	20
Humedad relativa (%)	0	0
Temperatura agua de refrigeración (°C)	20	20
DATOS DE RENDIMIENTO		
Presión descarga bar (g)	7	7
Potencia eléctrica de mínima carga (kW)	756,3	419,79
Caudal mínima carga (m ³ /min)	127,64	70,66
Potencia eléctrica plena carga (kW)	1172,95	613,05
Caudal admisión plena carga (m ³ /min)	220,35	111,77
Potencia al eje específica a plena carga (kW/(m³/min))	5,3	5,5

Tabla 14. Datos de fábrica de los compresores propuestos

[Referencia bibliográfica 14]

La Tabla 14 muestra los datos técnicos de los dos compresores propuestos.

El C1000 es capaz de generar 220 m³/min para una potencia de 1172,95 kW, mientras el C700 es un compresor más pequeño que consume a plena carga 613,05 y entrega 70,66 m³/min.

Si se comparan ambas potencias específicas, se observa que funciona mejor el C1000.

A continuación en la Ilustración 47, se muestra el funcionamiento de los compresores centrífugos propuestos para la sala 1:

Compresores centrífugos

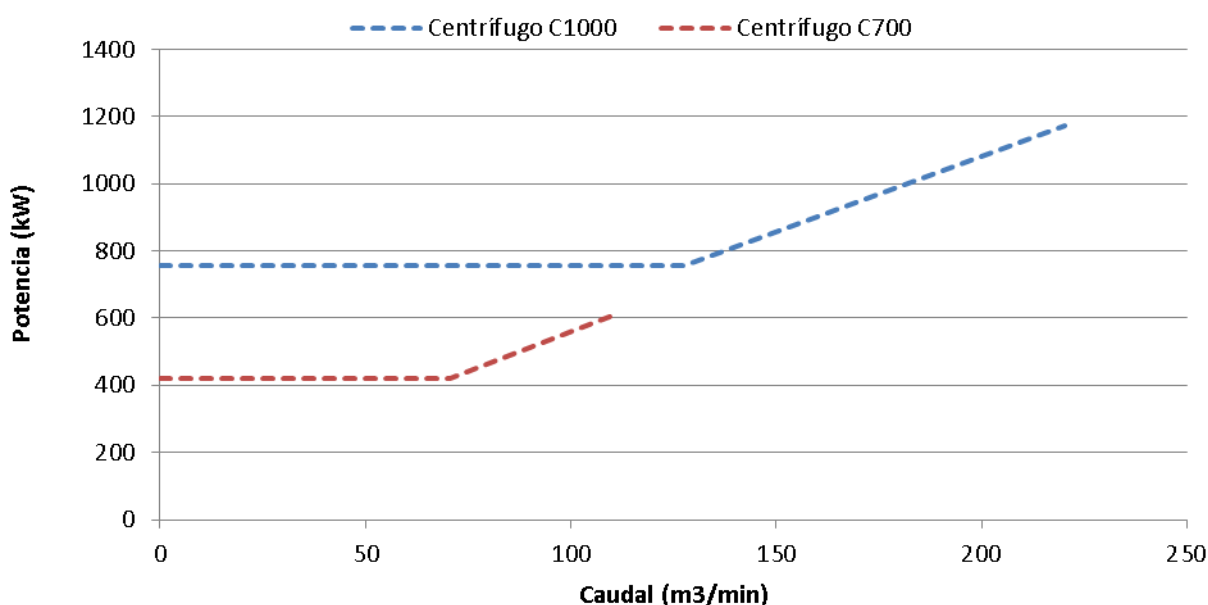


Ilustración 47. Funcionamiento del compresor centrífugo C1000 y C700

En el apartado “2.3.2 El compresor y su clasificación” dónde se explicaba el funcionamiento de un compresor centrífugo se habló de tres puntos fundamentales de trabajo. Para el compresor C1000 (azul) se observa un punto de mínima carga de 756 kW mientras el compresor C700 (rojo) consume 419 kW. Los compresores consumirán esa potencia en todo el rango de caudal desde 0-127,64 m³/min en el caso del C1000 y 0-70,66 m³/min para el C700. Después el compresor comienza a regular ajustándose al caudal necesario. El compresor azul a plena carga puede entregar 220,35 m³/min frente a los 111,77 m³/min del compresor rojo.

a) Propuesta 1:

La propuesta 1 (de color rojo) se trata de un compresor C1000 que es capaz de generar el caudal necesario, además coincide la zona de mayor porcentaje de funcionamiento de aire con el tramo donde el compresor regula el caudal. En esta zona, donde el compresor regula, obtenemos una potencia específica mejor que en la zona de mínima carga, por lo que nos interesa que el pico de funcionamiento coincida con en esta zona, puesto que es más eficiente.

Comparativa

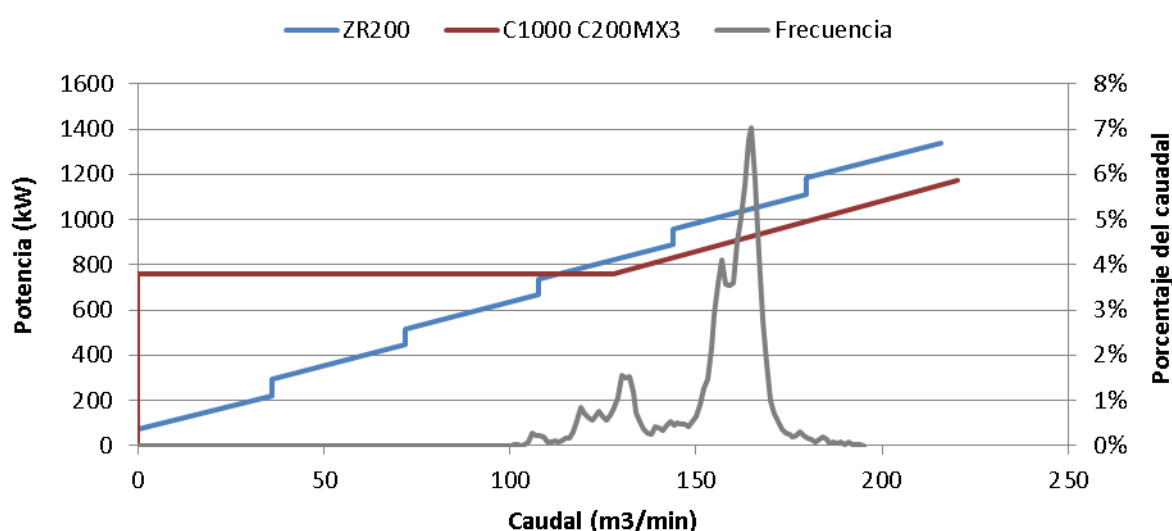


Ilustración 48. Frecuencia de Caudal y funcionamiento de los compresores de la sala 1

Los datos de potencia consumida durante un año para la primera propuesta es la siguiente:

	ZR200	C1000 C200MX3
Potencia media (kW)	1.062,63	881,34
Potencia año (kWh)	9.032.323,43	7.491.412,85
Coste de la energía (€)	903.232,34	749.141,28
Ahorros	/	154.091,06

Tabla 15. Datos de fábrica de los compresores propuestos

Después de calcular el consumo anual para la nueva propuesta se obtienen los datos reflejados en la Tabla 15. La potencia media se calcula integrando cada porcentaje de funcionamiento con el consumo en potencia asociado a ese caudal.

Una vez obtenido este valor, se multiplica por 8500 horas que son las estimadas que funcionará esta planta durante el año y así se obtiene los kWh. Seguidamente se multiplica esta cantidad por 0,1 € que es el valor del kWh y se consigue el consumo anual de energía. Este valor asciende a **749.141 €**, si se compara con lo consumido por la instalación actual (**903.232 €**) se observa un ahorro de **154.091,06 €**.

c) Propuesta 2:

La propuesta 2 (de color rosa) se trata de dos compresores C700 los cuales trabajaran compartiendo carga, es decir se enciende el primer compresor, llega a su máximo punto de funcionamiento y entonces entra el segundo compresor. Ambos compresores van al punto de mínima carga y empiezan a trabajar en paralelo como si se tratara de un solo compresor, regulando el caudal necesario hasta el punto de plena carga donde consumiendo 1226 kW es capaz de generar 223 m³/min. Se observa que con esta nueva disposición, la línea rosa se encuentra en todo momento por debajo de la azul para el tramo donde hay frecuencia.

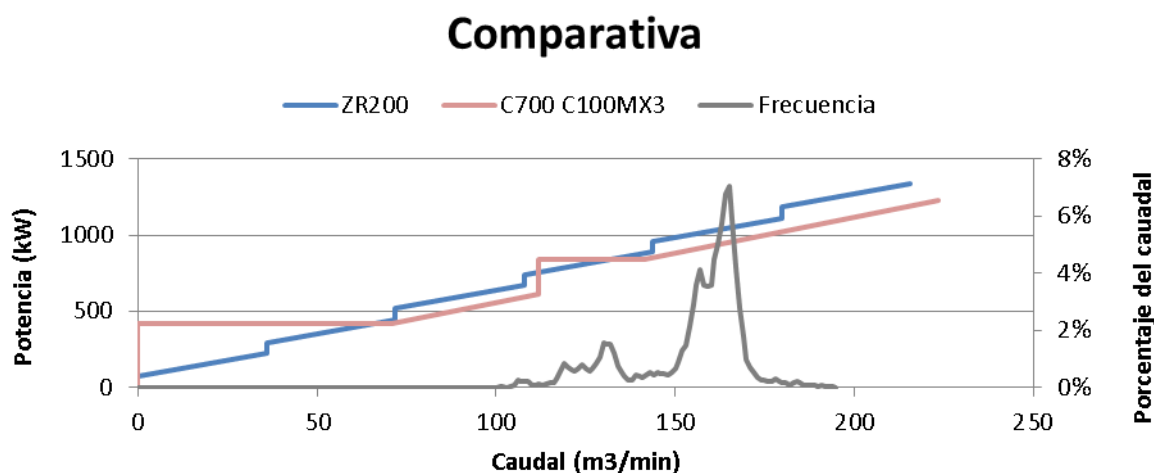


Ilustración 49. Frecuencia de caudal y funcionamiento de los compresores de la sala 1

Los datos de potencia consumida durante un año para la primera propuesta, que resulta ser la más ventajosa es la siguiente:

	ZR200	C700 C100MX3
Potencia media (kW)	1.062,63	913,31
Potencia año (kWh)	9.032.323,43	7.763.105,60
Coste de la energía (€)	903.232,34	776.310,56
Ahorros	/	126.921,78

Tabla 16. Datos de fábrica de los compresores propuestos

Después de calcular el consumo anual para la nueva propuesta se obtienen los datos reflejados en la tabla de arriba. La potencia media la obtenemos integrando cada porcentaje de funcionamiento con el consumo en potencia asociado a ese caudal. Una vez obtenido este valor, se multiplica por 8500 horas que son las estimadas que funcionará esta planta durante el año y así obtenemos los kWh. Seguidamente se vuelve a multiplicar esta cantidad por 0,1 € que es el valor del kWh y se obtiene el consumo anual de energía. Este valor asciende a 776.310 €, si se compara con lo consumido por la instalación actual (903.232 €) se advierte un **ahorro de 126.921,78 €** aunque esta **segunda opción genera un ahorro inferior que la anterior propuesta.**

5.2 PROPUESTAS SALA 2

A continuación se resumen los resultados de la sala 2, se obtiene un valor de consumo de potencia actual, se proponen alternativas y calculan los consumos y se comparan los resultados.

5.2.1 Funcionamiento actual

En el siguiente apartado se muestra el modelo de funcionamiento actual de la sala 2 que consta de 4 compresores fijos funcionando en cascada, es decir, cuando un compresor se enciende y no llega a producir el caudal suficiente, se enciende el compresor inmediatamente superior. Se observa en la Ilustración 50 que el funcionamiento de esta sala se cubre con 3 compresores.

Funcionamiento sala 2

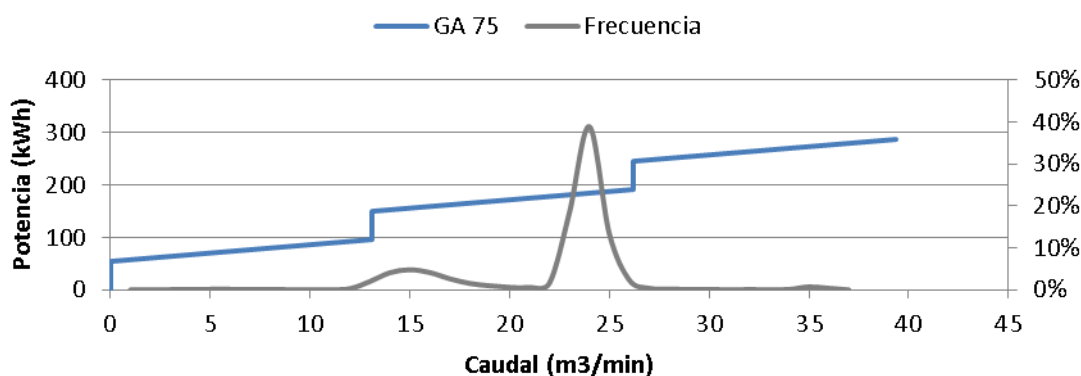


Ilustración 50. Funcionamiento actual de sala 2

5.2.2 Consumo anual actual

	GA 75
Potencia Media(kW)	190,79
Energía al año (kWh)	1.621.677,58
Coste de la energía (€)	162167,76

Tabla 17. Consumo anual en la sala 2

En la Tabla 17, en la primera celda es la potencia media, la segunda celda la se obtiene multiplicado el primer valor por 8500 horas que se estima como horas de la planta en funcionamiento, y por último se multiplica por el precio del kWh que es 0,1 €, para obtener el coste de la energía de la sala 2 que asciende a **162.167,8 €**.

5.2.3 Propuestas

Para las propuestas de la sala 2 se ha elegido mezclar dos tecnología (fija y variable) y de esta manera proponer la mejor solución. Los datos técnicos de cada compresor son los mostrados en la Tabla 18 que sigue.

Compresores rindiendo según diseño	GA 75	GA 75 + 7 % eficiencia	IRN 132K-OF	SL132A	R132 ie	R132 ne
CONDICIONES AMBIENTALES						
Presión ambiente	1,101	1,101	1,101	1,101	1,101	1,101
Presión en brida admisión	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Temp en brida de admisión (°C)	20	20	20	20	20	20
Humedad relativa (%)	0	0	0	0	0	0
Temperatura agua de refrigeración (°C)	20	20	20	20	20	20
DATOS DE RENDIMIENTO						
Presión descarga bar (g)	7	7	7	7	7	7
Potencia eléctrica de mínima carga (kW)	/	/	/	/	/	/
Caudal mínima carga (m3/min)	/	/	/	/	/	/
Potencia eléctrica plena carga (kW)	89,5	95,765	159,80	145,26	155,00	152,84
Caudal admisión plena carga (m3/min)	13,11	13,11	21,50	22,80	26,19	27,24
Potencia al eje específica a plena carga (kW/(m3/min))	6,8	7,3	7,4	6,4	5,9	5,6

Tabla 18. Datos de fábrica de los compresores propuestos

[Referencia bibliográfica 14]

A continuación se muestra el funcionamiento de los compresores que más tarde se van a emplear en las propuestas:

a) Compresores variables

Los compresores IRN 132k-OF en color azul y R132 ie en color rojo son los que combinados con otros fijos se proponen en la sala 2.

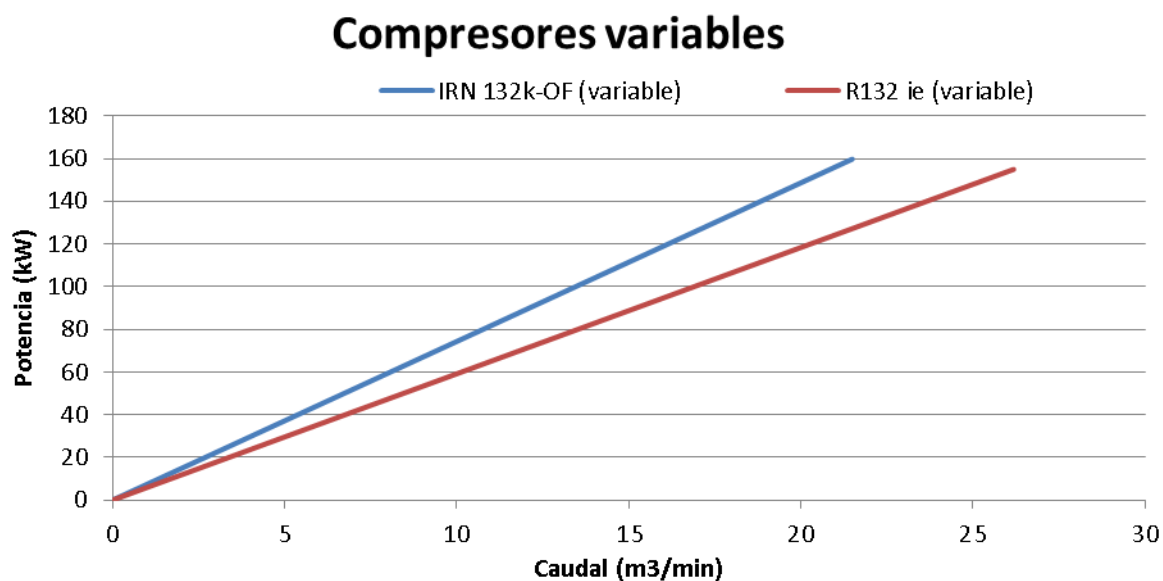


Ilustración 51. Funcionamiento de los compresores variables propuestos

Se observa en la Ilustración 51 una pendiente menos pronunciada del compresor R132 ie lo que significa una mejor potencia específica. Esta comparación no es relevante puesto que se ha de comparar el funcionamiento en el conjunto de un compresor fijo más otro variable.

b) Compresores fijos

Los compresores SL132 A en azul y R132 ne son los compresores fijos que se proponen para trabajar como base en las combinaciones que se verán más adelante en las propuestas.

Compresores fijos

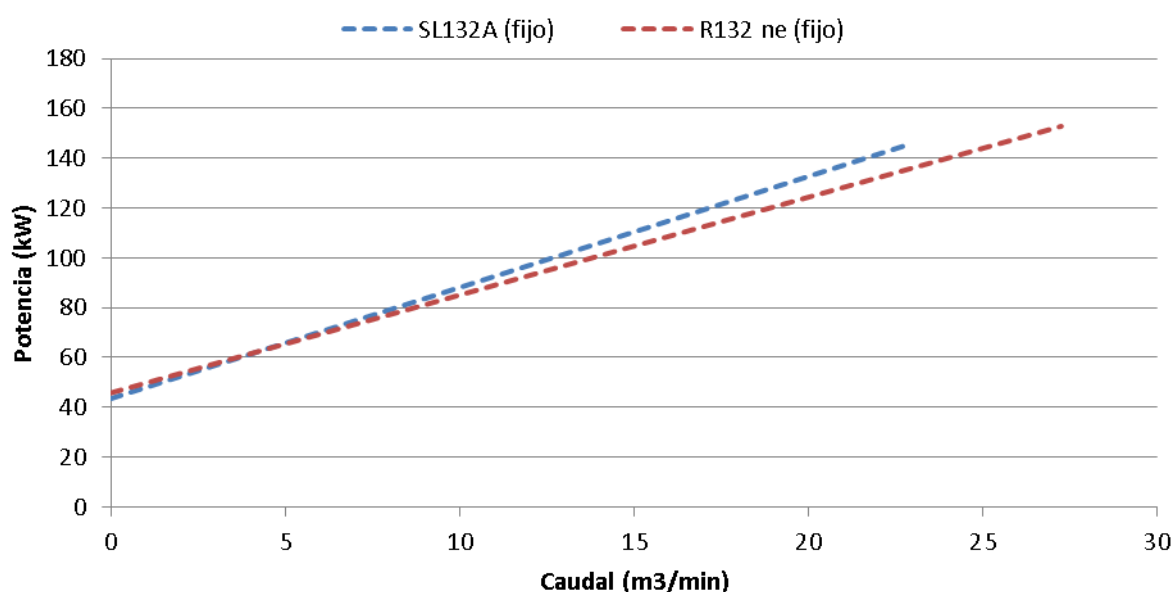


Ilustración 52. Funcionamiento de los compresores fijos propuestos

Se aprecia en la Ilustración 52, que es más competitivo el compresor rojo que el azul, aunque esta comparación no es relevante puesto que se ha de mirar el funcionamiento en conjunto de fijo más variable.

a) Propuesta 1:

La Ilustración 53 presenta la opción 1 que trata de un compresor fijo (SL 132A) y un compresor variable (IRN132K-OF). Primero empieza funcionando el fijo hasta 22,8 m3/min, consumiendo 145,26 kW. Después el compresor variable entrara a regular caudales superiores a 22,8 m3/min hasta un caudal máximo de 44,3 m3/min. Se puede observar que la propuesta 1 (verde) está por debajo de la gráfica de funcionamiento actual (rojo), lo que muestra que se genera un ahorro derivado de instalar esta nueva opción.

Propuesta 1

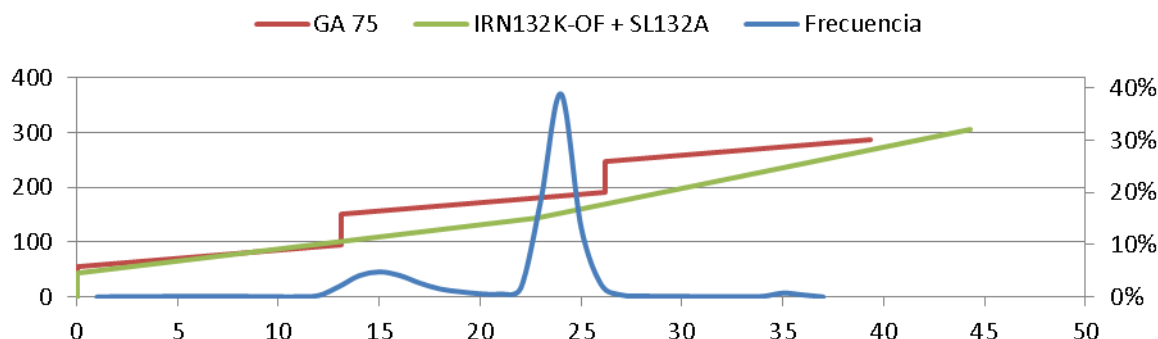


Ilustración 53. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 1 de la sala 2

La tabla siguiente muestra los datos de potencia consumida durante un año para la primera propuesta:

	GA 75	IRN132K-OF + SL132A
Potencia Media(kW)	190,79	145,64
Energía al año (kWh)	1.621.677,58	1.237.949,09
Coste de la energía (€)	162.167,76	123.794,91
Ahorros (€)	/	38.372,85

Tabla 19. Gastos energéticos anuales actuales y derivados de la propuesta 1

Después de calcular el consumo anual para la nueva propuesta, se obtienen los datos reflejados en la Tabla 19 que se muestra arriba. La potencia media se obtiene integrando cada porcentaje de funcionamiento con el consumo en potencia asociado a ese caudal. Una vez obtenido este valor, se multiplica por 8500 horas que son las estimadas que funcionará esta planta durante el año y así obtenemos los kWh. Seguidamente se multiplica esta cantidad por 0,1 € que es el valor del kWh y se obtiene el consumo anual de energía. Este valor calculado para la propuesta 1 asciende a **123.794,91 €**, si se compara con lo consumido por la instalación actual en la sala 2 (**162.167,76 €**) se observa un **ahorro** que ascienden a **38.372,85 €**.

b) Propuesta 2:

En la Ilustración 54 se observa la propuesta 2 de color morado que consiste en un compresor fijo en la primera parte de generación de caudal y un compresor variable en el segundo tramo, cuya función es regular el caudal demandado. El compresor R132ne (compresor fijo) es el primero en entrar a funcionar hasta un caudal de 27,24 m³/min, consumiendo 152,84kW. Para valores de caudal superiores entra a funcionar el compresor variable (R132ie) regulando el resto de valores hasta un caudal máximo de 53,43 m³/min.

Propuesta 2

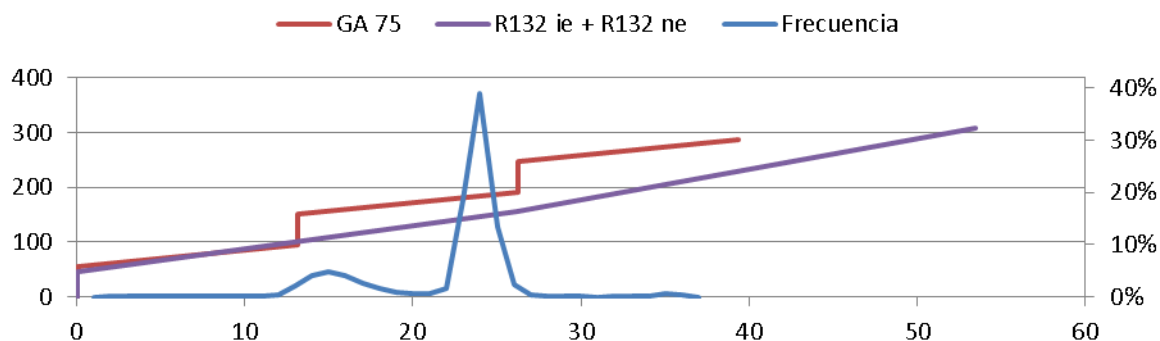


Ilustración 54. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2

Los datos de potencia consumida durante un año para la segunda propuesta se presentan en la tabla:

	GA 75	R132 ie + R132 ne
Potencia Media(kW)	190,79	144,54
Energía al año (kWh)	1.621.677,58	1.228.598,77
Coste de la energía (€)	162.167,76	122.859,88
Ahorros (€)	/	39.307,88

Tabla 20. Gastos energéticos anuales actuales y derivados de la propuesta 2

Después de calcular el consumo anual para la nueva propuesta se obtienen los datos reflejados en la Tabla 20. La potencia media la obtenemos integrando cada porcentaje de funcionamiento con el consumo en potencia asociado a ese caudal. Una vez obtenido este valor, se multiplica por 8500 horas que son las estimadas que funcionará esta planta durante el año y así se calculan los kWh. Seguidamente se multiplica esta cantidad por 0,1 € que es el valor del kWh y se obtiene el consumo anual de energía. Este valor calculado para la propuesta 2 asciende a **122.859,88 €**, si se compara con lo consumido por la instalación actual **162.167,76 €**, se observa un **ahorro de 39.307,88 €** y de las dos propuestas es **la segunda es la más eficiente y la que genera mayor volumen de ahorro**.

6. EVALUACIÓN (RETORNO DE INVERSIÓN)

En este capítulo se hace una evaluación de los consumos actuales, las propuestas y el precio de los compresores a instalar.

Una vez calculado el consumo de energía anual para la disposición actual y las propuestas de cada sala, se hace un resumen de los datos e incluye unos precios orientativos de los compresores propuestos y así obtener el retorno de inversión (ROI).

A continuación en la Tabla 21, se observa la ubicación, nombre, tecnología y precio de los compresores propuestos:

Ubicación	Compresor	Tecnología	Precio
Sala 1	C1000 C220MX3	Centrífugo	225.000,00 €
Sala 1	C700 C100MX3	Centrífugo	200.000,00 €
Sala 2	IRN132OF k	Variable	79.104,00 €
Sala 2	R132 ne	Variable	66.108,00 €
Sala 2	SL132A	Fijo	57.948,00 €
Sala 2	R132 ie	Fijo	61.254,00 €

Tabla 21. Gastos energéticos anuales actuales y derivados de la propuesta 2

[Referencia bibliográfica 14]

Se observa que los compresores centrífugos son las máquinas de precio más elevado, esto es debido a que son máquinas más grandes que el resto lo que implica que generan un mayor caudal. Dentro de los compresores de tornillo se diferencia entre fijos y variables, el precio de la tecnología variable es algo más elevado. Los compresores *Oil Free (OF)* cuentan con una lubricación sin aceite lo cual es obligatorio en ciertos sectores de la industria como la alimentación, en nuestro caso no es obligatorio y sólo es una opción a tener en cuenta.

Se añade el gráfico de frecuencia de caudal, propuestas y funcionamiento actual para observar gráficamente estos ahorros. Se advierte que la línea granate va siempre por encima de la azul y de la rosa en el tramo de consumo de caudal, luego es de esperar que sea la mejor opción.

En la Ilustración 55 se muestran las dos propuestas para la sala 1, el funcionamiento actual y la curva de frecuencia para de esta manera poder entender el análisis llevado a cabo.

6.1 RETORNO DE INVERSIÓN DE LA SALA 1

En la sala 1 se observa que la mejor opción es la de emplear un solo compresor (C1000) puesto que la línea granate se encuentra en todo momento por debajo de la configuración de compresores actuales y la propuesta de emplear dos compresores C700.

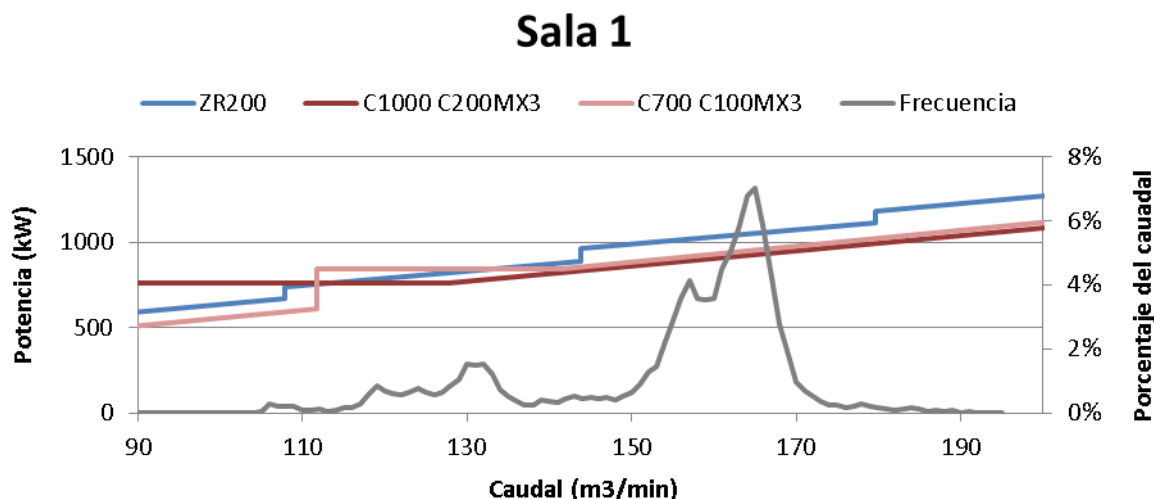


Ilustración 55. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2

En la tabla que se muestra a continuación, Tabla 22, recoge los datos de consumo de energía durante un año de la sala 1 que asciende a 9.032.323,43 kWh mientras que con la primera propuesta se consume 7.491.412,85kWh, un 17,05 % menos que la instalación actual y en la segunda propuesta 7.763.105,60 €, un 14,05 % de consumo menos. La propuesta que menos consumo tiene en la sala 1 y por tanto la más idónea es la primera opción planteada.

	ZR200	C1000 C200MX3	C700 C100MX3
Potencia media (kW)	1.062,63	881,34	913,31
Potencia año (kWh)	9.032.323,43	7.491.412,85	7.763.105,60
Coste de la energía (€)	903.232,34	749.141,28	776.310,56
Ahorros	/	154.091,06	126.921,78
Budget	/	225.000,00	400.000,00
Roi	/	1,46	3,15

Tabla 22. Consumo energético anual para la sala 1.

Para hacerse una idea del tiempo que se tardará en recuperar la inversión inicial se recurre al ROI, este se calcula dividiendo el precio de los compresores que se quiere instalar entre el ahorro generado al modificar la instalación.



Se observa que con la propuesta 1 el ROI es de 1,46 mientras que con la segunda es superior 3,15 con lo que la primera opción es la mejor opción de las dos. Esta diferencia se deriva de un consumo menor en la propuesta 1 y además que el Budget (presupuesto) es inferior, puesto que la propuesta 1 sólo emplea una máquina mientras que la otra trabaja con dos.

6.2 RETORNO DE INVERSIÓN DE LA SALA 2

En la sala 2 según la Ilustración 56 que se muestra a continuación, la mejor opción es la morada (R132 ie + R132 ne).

Sala 2

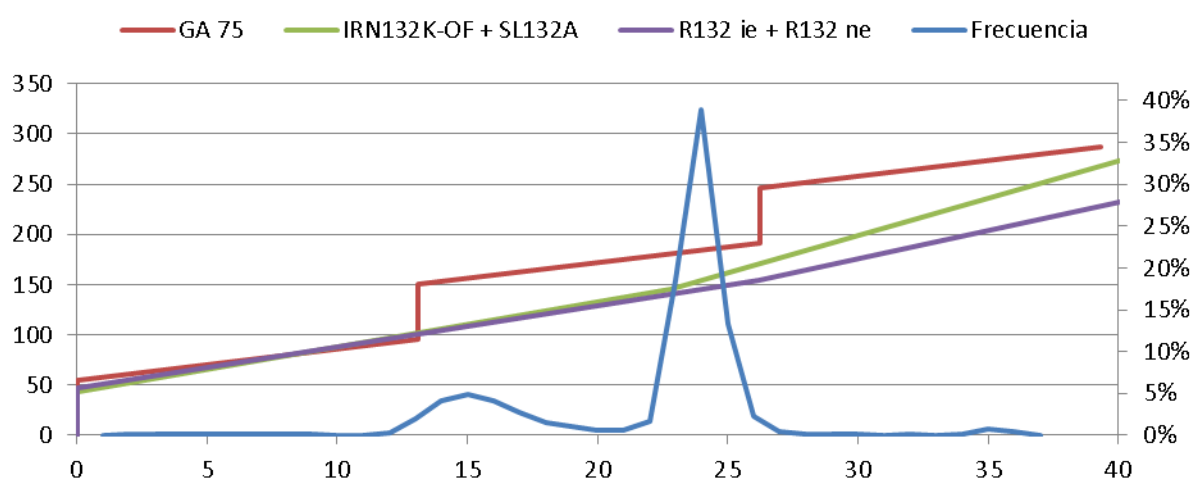


Ilustración 56. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2

La tabla que sigue, Tabla 23, recoge los datos de **consumo actual de energía durante un año de la sala 2** que asciende a **1.621.677,58 kWh**, mientras que con la primera propuesta se consume **1.237.949,09 kWh**, un **23,66 % menos** que la instalación actual y en la **segunda propuesta 1.228.598,77 €**, un **24,24 % de consumo menos**.

La propuesta que menos consumo tiene para la sala 2 y por tanto más idónea es la segunda.

	GA 75	IRN132K-OF + SL132A	R132 ie + R132 ne
Potencia Media(kW)	190,79	145,64	144,54
Energía al año (kWh)	1.621.677,58	1.237.949,09	1.228.598,77
Coste de la energía (€)	162.167,76	123.794,91	122.859,88
Ahorros (€)	/	38.372,85	39.307,88
Budget (€)	/	137.052,00	127.362,00
Roi (años)	/	3,57	3,24

Tabla 23. Consumo de potencia y coste de la energía para la sala 2.

Para hacernos una idea del tiempo que tardaremos en recuperar la inversión inicial se recurre al ROI, éste se calcula dividiendo el precio de los compresores que se quiere instalar entre el ahorro generado al cambiar la instalación.



Se observa que con la propuesta 1 el ROI es de 3,57 mientras que con la segunda es algo inferior 3,24, con lo que sigue siendo la mejor opción de las dos la segunda propuesta. Esta diferencia se deriva de un consumo menor en la propuesta 2 y además un precio inferior de budget del conjunto de los dos compresores.

7. PRESUPUESTO

El presupuesto calculado incluye el precio del transporte de los compresores, la puesta en marcha de las nuevas máquinas y el precio de los compresores instalados.

El transporte de los compresores será desde la fábrica de los compresores en Italia hasta Sestao por medio terrestre. Este servicio lo realizará una empresa de transporte especializada. Se dispone de un camión, puesto que se van a instalar en la planta 3 compresores y estos caben en un solo tráiler. El coste del servicio de transporte a cargo de la empresa transportista es de 2000 €.

La puesta en marcha y el training consiste en instalar los nuevos compresores en la red de aire comprimido, poner en marcha y verificar que funciona según lo ideado. Este trabajo lo deben realizar técnicos cualificados. Se emplean al menos dos días para la puesta en marcha y otro día para la verificación del funcionamiento. El gasto que conlleva la instalación asciende a 700 € por día empleado.

Producto	Descripción	Unidades	Precio €/ unidad	Precio (€)
Transporte compresor	Transporte desde la fábrica hasta la planta del cliente. Sólo es necesario un camión para el transporte de todos los compresores.	1	2.000,00	2.000,00
Puesta en marcha y training	Instalación y puesta en marcha de los compresores. Como mínimo se emplean 2 días de puesta en marcha más 1 día de training.	3	700,00	2.100,00
R132 ie	Compresor de tornillo fijo de caudal máximo 26,19 m3/min.	1	57.948,00	57.948,00
R132 ne	Compresor de tornillo variable de caudal máximo 27,24 m3/min.	1	66.108,00	66.108,00
C1000 C2200MX3	Compresor centrífugo de caudal máximo 111,77 m3/min.	1	225.000,00	225.000,00
Total				353.156,00

Tabla 24. Presupuesto para la nueva instalación

La Tabla 24 de arriba resume el **gasto total necesario para llevar acabo el cambio de compresores** en la planta del cliente. Esta cantidad **asciende a 353.156,00 €**. Se observa que es una cantidad elevada la que hay que hacer pero es necesaria si queremos renovar la maquinaria antigua y sustituirla por tecnología más moderna.

8. CONCLUSIONES

En este capítulo se hace una reflexión global después de desarrollar y valorar todos los capítulos anteriores.

8.1 CONCLUSIONES PARA LA SALA 1

Después de estudiar los resultados recogidos en la planta y hacer dos propuestas diferentes para cada sala se ha elegido la mejor solución posible de cara al consumo de potencia anual.

Actualmente la sala 1 posee seis compresores funcionando en cascada, es decir se enciende uno detrás de otro en función del caudal demandado.

Para la sala 1 se ha propuesto un **compresor centrífugo C1000** que se ajusta al grueso del funcionamiento de esta sala consumiendo menos potencia. Este nuevo compresor es capaz de **generar 220,35m³/min**, de esta manera se **sustituye 6 compresores de tornillo fijo** por uno solo **compresor de tecnología centrífuga**.

A continuación sobre la gráfica, Ilustración 57, se puede observar el funcionamiento actual de los compresores, funcionamiento propuesto y el consumo de caudal.

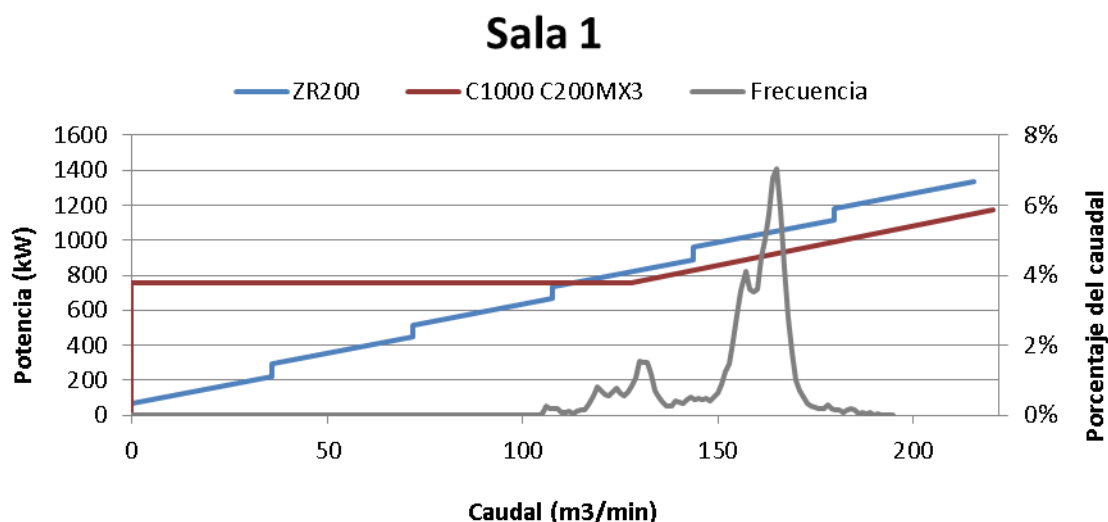


Ilustración 57. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2

En la Ilustración 57, se observa que la línea azul (instalación actual) en la zona de mayor uso de caudal de la planta, entre 150 m³/min y 170 m³/min, queda por encima de la línea roja (instalación propuesta). Lo que significa que la propuesta nueva (C1000) tendrá un consumo de potencia inferior al actual. Generando un ahorro considerable.

	ZR200	C1000 C200MX3
Potencia media (kW)	1.062,63	881,34
Potencia año (kWh)	9.032.323,43	7.491.412,85
Coste de la energía (€)	903.232,34	749.141,28
Ahorros	/	154.091,06

Tabla 25. ROI sala 1

Actualmente la **sala 1** de la instalación está **consumiendo 9.032.323,43 kWh** anualmente. Además tiene un compresor que solo funciona el 11% y se pasa el **89 % en vacío** (lo que supone consumo de potencia) sin entrar a producir caudal. Lo que demuestra que se podría prescindir de este compresor, **la sala 1 está sobredimensionada**.

Con la **solución propuesta** todo el caudal demandado lo cubriría un compresor únicamente consumiendo **7.491.412,85 kWh**, se debe tener en cuenta que se ahorrará también en mantenimiento puesto que se pasa de seis compresores a uno solamente. La propuesta es un **17,06 % más eficiente** que la instalación actual respecto a los consumos de potencia.

8.2 CONCLUSIONES PARA LA SALA 2

Actualmente en la sala 2 hay cuatro compresores fijos funcionando en cascada, sólo están representados 3 porque hay uno que nunca se encendió durante la medición. La solución propuesta consiste en un compresor fijo R132 ie que cubre la zona de poco uso de caudal y después para regular otros caudales superiores entra en funcionamiento el compresor variable R132ne, pudiendo llegar a generar 53,43 m³/min.

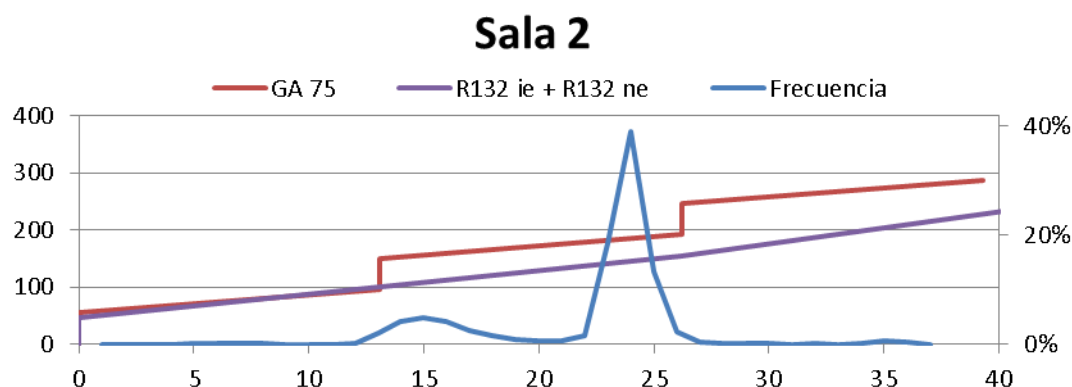


Ilustración 58. Frecuencia de caudal, funcionamiento actual y propuesta 2 de la sala 2

	GA 75	R132 ie + R132 ne
Potencia Media(kW)	190,79	144,54
Energía al año (kWh)	1.621.677,58	1.228.598,77
Coste de la energía (€)	162.167,76	122.859,88
Ahorros (€)	/	39.307,88

Tabla 26. ROI sala 2

En La Ilustración 58 se observa el funcionamiento de las máquinas actuales, la nueva propuesta y el consumo de caudal de la sala 2.

En los tramos de mayor consumo, entre 22 m³/min y 27 m³/min, la línea morada que corresponde a la propuesta de incluir el compresor R132 ie y el R132 ne se encuentra siempre por debajo de la solución actual (línea roja).

La solución actual tiene un **consumo anual de 1.621.677,58 kWh** mientras que la **propuesta** para la **sala 2** obtendría un consumo de **1.228.598,77 kWh** es decir **un 24,23 % más eficiente**.

En la **sala 2** hay un compresor que **nunca se enciende**, es decir la **sala 2 está sobredimensionada** nuevamente.

8.3 CONCLUSIÓN GLOBAL

En la conclusión global se van a sumar los ahorros de ambas salas que se van a derivar de sustituir los compresores viejos por los nuevos. Después esta suma se va a dividir por los costes de los nuevos compresores, la puesta en marcha y el transporte. De este modo se va a obtener un nuevo ROI, más completo, que incluye otros gastos a parte del precio de los compresores.

La Tabla 27 muestra los datos del costo total derivado de sustituir la instalación antigua por la nueva, los ahorros generados al realizar esta sustitución y el retorno de inversión calculado.

Al **calcular el ROI** teniendo en cuenta el presupuesto, se obtiene un retorno de inversión bastante aceptable de **1,83 años**. Lo que significa que en **menos de dos años** se habrá **recuperado la inversión inicial** y a **partir** de este tiempo **está obteniendo importantes ahorros cada año**.

Costo total nueva instalación	Ahorros	ROI
353.156,00	193.398,94	1,83

Tabla 27. ROI general.

9. BIBLIOGRAFÍA

Libros y publicaciones ⁽¹⁾:

- [1] Ahorro de energía en el aire comprimido. Fluidos: Oleohidraulica, neumática y automatización. 2008 nº 338, p. 406-409. ISSN 0211-1136
- [2] Arcelor Mittal (2007).El proceso siderurgico. 2ª ed.rev. y corr. La Toba (Asturias): Arcelor Mittal, 2007.
- [3] Atlas Copco (2011). Manual de aire comprimido. 7ª ed., Coslada (Madrid): Atlas Copco, 2011
- [4] Campos Avella, J.C (Fecha no disponible). Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido [en línea]. Disponible en web: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/aire.pdf> [Consulta: 13 de Julio de 2014]
- [5] Carnicer Royo, E. (1980) Aire comprimido. Madrid: Gustavo Gili, 1980-81. 2v. ISBN 84-252-0662-6
- [6] Carnicer Royo, E. (1997) Sistemas industriales accionados por aire comprimido. Madrid: Paraninfo, 1997. ISBN 84-283-2325-9
- [7] Estrucplan (2011). Compresores centrífugos y rotativos [en línea]. Compresores. Parte 2. Disponible en web: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2834> [Consulta: 7 de agosto 2014]
- [8] Enríquez Berciano, J.L et al. (2010). Laminación [en línea] .Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte IV. Disponible en web: http://oa.upm.es/2074/1/LAMINACION2_MONO_2010.pdf [Consulta: 14 de agosto de 2014].
- [9] Ingersoll Rand (2004).Guía sobre la calidad del aire [en línea].Disponible en web: http://www.etapa.net.ec/Documentos%20Varios/Gesti%C3%B3n%20Ambiental/Aire/Air_Quality_SPAN.pdf [Consulta: 12 de junio de 2014]
- [10] Schutze Alonso, O. (1961) Moldeo y fundición. Barcelona: Gustavo Gili. 1961
- [11] Sedel Aircomp Systems (2010).Historia y tipos de compresores [en línea]. Disponible en web: <http://www.sedelaircompsystems.es/historia-y-tipos-de-compresores.html> [Consulta: 23 de julio de 2014]
- [12] Tratamiento de aire comprimido. Automática e instrumentación. 2006, n.308, p.60-62. Barcelona: Cetisa Editores, 1985-. ISSN 0213-3113

Webs consultadas:

- [13] http://noticias-de-hoy.es/arcelormittal_sestao
- [14] http://www.ingersollrandproducts.com/eu_es.aspx
- [15] <http://www.clusterenergia.com/ficha.asp?id=9>
- [16] http://fuelleseltemplario.mex.tl/frameset.php?url=/154626_Historia-del-Fuelle.html
- [17] <http://spain.arcelormittal.com/>

⁽¹⁾ Para las citas en el texto se ha seguido el sistema de nombre y fecha, la referencia bibliográfica completa se presenta en Bibliografía, en una lista ordenada alfabéticamente según la Norma ISO 690.
Para los citas de las direcciones electrónicas se ha seguido la Norma ISO 690-2.